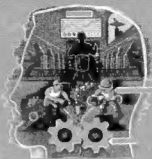


جون ر. بيرس



ترجمة: المهندس فايز فوه العلاء

قدمة إلى نظرية المعلومات

الرموز، الإشارات، والضجيج



Bibliotheca Alexandrina



0035252

العلوم
(٤)

اللائحة الفنية ، زهير كمو

مقدمة إلى نظرية المعلومات

العلوم

٤

جورج ر. بيرس

مقدمة إلى نظرية المعلومات

الرموز، الإشارات، والضجيج

ترجمته:

الهندس فايز فوه العاوة



منشورات وزارة الثقافة

الجمهورية العربية السورية

دمشق ١٩٩١

AN INTRODUCTION TO INFORMATION THEORY

Symbols, Signals & Noise

JOHN R. PIERCE

Professor of Engineering
California Institute of Technology

Second, Revised Edition

مقدمة إلى نظرية المعلومات = An Introduction to
Information theory : الرموز ، الإشارات والضجيج / تأليف
جون . ر . بيرس ، ترجمة فايز فوق العادة . - دمشق : وزارة الثقافة ،
١٩٩٠ - ٣٦٨ ص : موضح ، ٢٤ سم - (علوم ، ٤) .

١ - ١٥٢ ر . ب . ي . د م ٢ - العنوان ٣ - بيرس ٤ - فوق العادة
٥ - اللغة .

مكتبة الامد

الايداع القانوني ع - ٢٩٩ / ٥ / ١٩٩٠

إهداء المؤلف

إلى كلود
وبيتي شانون

مقدمة المؤلف

ان اعادة نشر هذا الكتاب اتاح لي الفرصة لتصحيح كتاب سابق كنت قد الفته منذ حوالي عشرين سنة بعنوان : الرموز ، الاشارات والفصيح ، واعادة النظر فيه بحيث يصبح متمشيا مع الوضع الراهن من التطور . ونظرا لان الكتاب يتعلق بعمل شاتون بشكل رئيسي ، والذي سيبقى خالدا الى الابد ، فان اعادة النظر في مؤلفي السابق لم يترتب عليها اجراء الكثير من التغييرات ، ففي بعض الاماكن غيرت التواريخ الخاصة ببعض العلماء الذين توفوا ، الا انني لم احاول استبدال مصطلح هزة في الثانية (ه/ثا) بالمصطلح الاحداث هرتز/ثانية (هر / ثا) وكذا لم ابدل في كل المواضع مصطلح شاتون : نظرية الاتصالات بالمصطلح الاحداث الذي استخدمه اليوم : نظرية المعلومات .

لقد قمت بتغيير بعض الاشياء ، كاعادة كتابة بعض الفقرات وحوالي عشرين صفحة دون تغيير في ترقيم الصفحات .

ففي الفصل العاشر : نظرية المعلومات والفيزياء ، قمت بتغيير درجة حرارة خلفية الكون من (درجتين كلفين الى اربع درجات) وفق كتابي السابق (لا اعلم من اين اتيت بهذا التقدير في حينه) ، الى القيمة الصحيحة ٢.٥ كلفين ، كما حذدها بنزائيس وويلسون . واستنادا لحقيقة انه في غياب الفصيح يمكننا ان نثبت عدد لا حصر له من واحداث البيت في كل واحدة كم ، فقد اصفت مادة جديدة عن التاليفات الكمية في الاتصالات . كما قمت باستبدال مثال قديم عن الاتصال الفضائي بتحليل مختصر لثبث الميكروني لاشارات الصور من مركبة فويجر بقرب المشتري ، كذلك عرضت احتمالات جديدة .

اما في الفصل السابع المعنون « الترميز الفعال » فقد أعدت كتابة بعض الصفحات المتعلقة بالترميز الفعال لمصادر التلفزة وغيرت بعض الفقرات الخاصة بتعديل الترميز التبقي ومرمزات الأصوات . كذلك غيرت في المادة المتعلقة ببحث تصحيح الأخطاء بواسطة الترميز .

وفي الفصل الحادي عشر ، فصل السيبرنيتيك ، أعدت كتابة أربع صفحات عن الحاسبات الالكترونية والبرمجة والتي تقدمت بشكل يفوق التصور خلال العشرين سنة الماضية .

وأخيرا فقد أجريت بعض التغييرات الطفيفة في الفصل السادس عشر القصير والآخر : عودة الى نظرية الاتصالات .

وعلى خلفية هذه التغييرات الفت نظر القارئ الى سلسلة من الأبحاث في تاريخ نظرية المعلومات نشرت في دوريات علمية بعنوان محاضر عن نظرية المعلومات وكذلك الى كتابين هامين يتحدثان بتفصيل أكبر عن الوضع الراهن لنظرية المعلومات والجوانب الرياضية للاتصالات هما : نظرية المعلومات والترميز مؤلفه روبرت ماك اليس ، ومبادئ الاتصالات الرقمية والترميز مؤلفه أندريه فيتري .

ان عددا من فصول الكتاب الاصلي تتعلق بمواضيع لا تبرز اهميتها الا من خلال تطبيق او محاولة تطبيق نظرية المعلومات .

اعتقد ان الفصل الثاني عشر : نظرية المعلومات وعلم النفس يعطي فكرة معقولة عن نوع التطبيقات الجارية في ذلك المجال . لقد اصبح علماء النفس المعاصرون اقل اهتماما بنظرية المعلومات بالمقارنة مع علم الإدراك ، لأفكار مستمدة من علم أصل الإنسان واللغويات ، كما يستند الى اعتقاد جازم بان نظاما رياضيا بسيطا وفعالا يكمن في خلفية الوظائف الانسانية . يذكرني علم الإدراك المعاصر بعلم السيبرنيتيك قبل عشرين سنة . اما فيما يتعلق بنظرية المعلومات والفن ، فقد حل الكمبيوتر اليوم محل نظرية المعلومات بشكل جزئي ، الا ان المعلومات المتناولة في الفصل

الثالث عشر قد تم تعميقها . ساستعرض بعض الأشعار الجذابة التي انتجتها ماري بوروف ، وفما عرج على الأخص على بعض قواعد الإغاني الشعبية السويدية التي استطاع يوهان ساندبيرغ بواسطتها إنتاج عدد من الألحان الأصلية الجميلة .

يعود ذلك بنا الى اللغة والفصل السادس : اللغة والمعنى . لقد طرح ذلك الفصل مجموعة من المشاكل لم تحل خلال العشرين سنة الماضية . اننا لا نملك جملة كاملة من القواعد لأي لغة طبيعية ، في حين ان القواعد الحرفية والشكلية اثبتت فعاليتها وبشكل ناجح في لغات الكمبيوتر . لقد تحول الاهتمام في مجال اللغويات ، وفق ما أرى ، الى اعتبارات التصويت في اللغة المنطوقة ، ما هي اهم التراكيب الصوتية وكيف تتفاعل مع بعضها ، ولعل هذه الأبحاث من الأهمية بمكان في مجال الكمبيوتر ، اذ يمكن بواسطتها استنتاج الطرق الكفيلة بجعل الكمبيوتر ينطق نصاً مكتوباً في ذاكرته . لقد كتب شومسكي وهال كتاباً واسعاً عن الثبرات ، وتناول الموضوع ليبرمان وبرنس في تقرير متكامل مختصر .

هذا هو كل ما يتعلق بالتفسيرات التي أجريتها على الكتاب الأصلي : الرموز ، الإشارات ، والضجيج ، وعدا ذلك أعود لأكبر بعض ما ذكرته في مقدمة ذلك الكتاب .

لقد سررت فعلاً عندما اقترح ر. نيومان ان ألوم بتأليف كتاب عن الاتصالات ، وكان ملهمي في عملي التكنيكي هذا الجانب او ذاك من موضوع الاتصالات . وفعلنا شعرت ان من واجبي ان انقل الى القراء ما هو أكثر امتاعاً وامتناً من هذا الموضوع . لم يكن تحقيق هذا الهدف أمراً سهلاً ، سيما قبل عام ١٩٤٨ ، حين اصدر كلود شانون كتابه : (نظرية رياضية للاتصالات) . لقد جمعت نظرية شانون في الاتصالات ، والتي عرفت فيما بعد بنظرية المعلومات ، وفي بوتقة واحدة ، كل المشاكل التي كانت قد أرقت مهندسي الاتصالات لسنوات نعم ، كان بإمكان هذه النظرية ان تخلق نظاماً جديداً محدداً وواضحاً وان تحله محل جملة

سابقة من المسائل الخاصة والأفكار المشتتة والتي كان الارتباط بينها غامضاً وغير مفهوم . ولا يستطيع أحد اتهامني بانني من اتباع شانون ، دون نيته مكافأة فعلية لقاء ذلك الاتهام .

وهكذا تملكنتني قناعة كاملة بان تقريري عن الاتصالات يجب ان يعكس وبشكل امين نظرية المعلومات كما صاغها شانون . وكان على تقريري ان يكون اوسع من عمل شانون بتبنياته مدى ارتباط النشاطات الفكرية الانسانية المختلفة بنظرية المعلومات ، وكذلك ان يكون اعرض بامتصاده ما امنن عن الزبي الرياضي المحض .

هنا يبرز التناقض . ان تقريري يجب ان يكون اقل رياضية من تقرير شانون ، الا انه ليس بإمكانه ان يكون غير رياضي البتة ، فنظرية المعلومات هي نظرية رياضية تنطلق من فرضيات معينة تصف جوانب من الاتصالات التي ستعرض اليها ، وتصوغ باستخدام هذه الفرضيات استنتاجات منطقية متنوعة . تتجلى عظمة نظرية المعلومات في نظريات رياضية محددة غاية في الاهمية ومدى هشتها . وما اشبه الحديث عن نظرية المعلومات دون الاقتراب من جهازها الرياضي بالحديث عن مؤلف موسيقى عظيم دون اسماع الآخرين بعضاً من اعماله .

كيف تسنى لي ان اتحرك الى هدي ؟ بدا ان الكتاب يجب ان يكون محتوى في ذاته ، اي يجب ان يحقق فهم الرياضيات التي ينطوي عليها دون العودة الى مراجع اخرى او تذكر بعض مضامين كتب الرياضيات المدرسية ، كتعب المرحلة الثانوية مثلاً . هل يعني ذلك امتناعي عن ذكر اي علاقة رياضية ، كلا بالطبع ، بل يعني ان اعرض الجوانب الرياضية ببساطة وبلغة اولية . لقد فعلت ذلك في متن الكتاب وفي الملحق عند نهاية وباختصار يستطيع اي قارئ غير متمرس بالرياضيات ان يحصل اي اشكال بينه وبين الكتاب بمجرد التنقل بين المتن والملحق .

ماهي حدود الصعوبة التي كان عليّ الا اجتازها ، كان عليّ ان احدد بشكل مسبق اعقد علاقة رياضية سأتعرض لها ، وهذا يعني تجاوز

بعض النقاط الهامة ، ومهما يكن من أمر ، فقد بقي مؤلفي اسهل بدرجة كبيرة من الاقسام الصعبة من كتاب « عالم الرياضيات » مؤلفه نيومان . اما حيث تبلغ المعالجة مدى متقدماً من التعميد فقد اثرت عرض الخطوط العامة للرياضيات على تفصيل مضمونها .

على كل حال ، يتضمن هذا الكتاب بعض المقاطع الصعبة لفهم العلم بالرياضيات ، وانصح القارئ في هذه الحالة بتجاوز تلك المقاطع مكتفياً بنتائجها وحسب . وسيعرف كل القراء حين بلوغ نهاية الكتاب ان امراء المقاطع الصعبة كان امراً لا مفر منه ، ولعل فهم تلك المقاطع سيكون اكثر يسراً في القراءة الثانية للكتاب . ولو انني لم اضمن كتابي تلك المقاطع لما تمكن القارئ من بلوغ المستوى من فهم الموضوع الذي سيعتقه بعد دراسة الكتاب . اما المؤلفات الاخرى في نظرية المعلومات فهي في حدود معرفتي إما غاية في البساطة وإما صعبة لدرجة ان القارئ الجاد وغير الضعيف لن يستطيع اجتياز الاقسام السهلة المتعاقبة للاقسام السهلة من كتابي . اجد من واجبي ان اذكر ان بعض المؤلفات الاخرى في نظرية المعلومات مريكة بحق او هي خاطئة تماماً .

سيبرز ولا شك ، في هذه المرحلة ، تساؤل هام لدى القارئ ، مما اذا كانت نظرية المعلومات تستحق منه او من المؤلف كل هذا العناء . وكل ما استطيع قوله في هذا السياق هو ان نظرية المعلومات تساوي في الاهمية العلم والتكنولوجيا ، لان نظرية المعلومات جزء من عالم العلم والتكنولوجيا . ولعلها مهمة القارئ ان يحاول تكوين صورة مفهومة عن الموضوع والى الحد الذي يريد ، اذا كانت لديه رغبة اكدية بسبر عالم المعرفة والتكنولوجيا . ان صورة نظرية المعلومات يجب ان تبدو غريبة وغير مفهومة كما ان ادراكها يجب ان يكون سهلاً ودون توظيف ما يلزم من الجهد .

لم يكن تأليف هذا الكتاب امراً يسيراً ، وربما تعذر إنجازه لولا سائده مؤلف كلود شانون . لقد ساهم كلود شانون مساهمة كبيرة في اخراج

الكتاب بقرائه وفي إسداء النصح حول ما يتعلق بضرورة اجراء بعض التغيرات فيه ، اما دافيد سليبيان فقد اخرجني عن مسار الخطأ بشكل حاسم في حين نبهني اي . ن . جيلبرت الى القلط في أكثر من مناسبة . راجع ميلتون باييت الفصل الخاص بتظرية المعلومات والفن مطمئنا ايلي بشأنه ومقترحا بعض التغيرات ، وفي مجال علم النفس اهدت من مشورة كل من ب . د . بريكر ، ه . م . جينكنز ، و . ن . شيبارد ، وان كانت الآراء المثبتة في النهاية غير صادرة عنهم . لقد كانت مساعدة م . ف . ماثيوز كبيرة ، بينما قدم بينوت مانديروت الدعم في كتابة الفصل الثاني عشر ، وقام بقراءة المخطوطة ج . ب . رانيون ، وكشف عن الأخطاء الانشائية إديك وولان مزودا ما يلزم من التوجيه . كما انني ادين للبروفسور مارتن هارويت الذي اقممني واقنع دار نشر دوفر بضرورة إعادة طبع الكتاب . ويدين القارئ بدوره لجيمس . ر . نيومان لتحقيقه لإرادي خلاصات في نهايات الفصول ، ولما ولائي أخيرا تبسيط بعض النقاط وجعلها اسهل . انني ادين لكل هؤلاء ، ولا ادين باقل للنسبة ف . م . كوستلو التي استطاعت ان تميد النظام الى فوضى المخطوطة حيث اعتبتها واصبحتها باشكالها . اما بخصوص هذه الطبعة الجديدة فادين بالكثير لسكرتيري السيدة باتريشيا . ج . نيل .

أيلول ١٩٧٩

ج . د . بيرس

المفصل الأول

العالم والنظريات

نشر كلود . اي . شانون عام ١٩٤٨ بحثاً بعنوان (نظرية رياضية للاتصالات) وتحول البحث إلى كتاب عام ١٩٤٩ . اما قبل ذلك التاريخ فقد اقتصر الأمر على بعض البحاثة المتفرقين يحققون بعض الانجازات المنزلة في نظرية الاتصالات بين الفينة والاخرى . والآن وبعد حوالي ثلاثين سنة ، أصبحت نظرية الاتصالات ، او كما تسمى في بعض الأحيان نظرية المعلومات ، مجالاً للبحث معترفاً به . لقد نشر العديد من الكتب حول نظرية الاتصالات وعقدت حولها الندوات والمؤتمرات الدولية .

مؤسس معهد المهندسين الكهربائيين والالكترونيين مجموعة عمل متخصصة في نظرية المعلومات تنشر دراستها بشكل دوري ستة مرات في السنة . كما تنقل مجلات اخرى مقالات متفرقة عن نظرية المعلومات .

نحن جميعاً نستخدم كلمتي الاتصالات والمعلومات ، ومن غير المحتمل ان نقلل من اهميتها . لقد عقب فيلسوف معاصر هو آ. ج. آبر على الاهمية القصوى والمعنى الواسع للاتصالات في حياتنا ، فوق رأيه ، لا تقصر مبادلاتنا على المعلومات فقط ، بل تمتد الى المعرفة ، الخطأ ، الآراء ، الأفكار ، الخبرات ، الآمال ، الأوامر ، الانفعالات ، العواطف والطباع . ان الحرارة والحركة كليهما يمكن نقلهما ، وكذا القوة ، الضعف والمرض . وينسوه الفيلسوف بأمثلة وتطبيقات اخرى عن التظاهرات المربصة واللغزة للاتصال في عالم الانسان .

وهكذا فالاتصالات بالغة الأهمية ومتنوعة ، ولذا تبرز أهمية نظرية علمة من الاتصالات ، نظرية متماسكة ومفيدة . أما إذا أضفنا الى كلمة « نظرية » كلمة « رياضية » بكل ما تنطوي عليه من سحر وصرامة ، اذن لاستحالت مقاومة الإغراء ولو تعلمنا بعض العلاقات لطلنا كل مشاكلنا في الاتصالات ولاصبحنا سادة المعلومات عوضاً عن أن تكون عبيد المعلومات الخاطئة .

ولكن للأسف ليس هذا هو مسار العلم ، فمثلاً سنة ٢٣٠٠٠ تناول فيلسوف آخر هو أرسطو في بحثه عن الفيزياء مفهوماً عاماً للاتصالات هو مفهوم الحركة .

عرف أرسطو الحركة بأنها تحقيق ما هو كامن اذا كان موجوداً فعلاً بشكل كامن ، وضمن في مفهوم الحركة الزيادة والنقص لكل ما يمكن أن يزيد أو ينقص ، وإن يقترب أو يبتعد ، وأخيراً ما يمكن بناؤه . تحدث أرسطو عن ثلاثة أصناف من الحركة وذلك وفق شدتها ، تأثيره ومكانها . لقد وجد فعلاً ، كما قال ، أنواعاً عديدة من الحركة تساوي مجموعها عدد المعاني المختلفة لكلمة : يكون .

نواجه الحركة هنا بكل تمقيدها الجلية ، تلك التعقيدات التي تبدو مربكة لنا فعلاً ، لأن ارتباط الكلمات ببعضها يختلف من لغة لأخرى ، وعلى كل حال لن نعني بالحركة كل التغيرات التي تحدث عنها أرسطو بالضرورة .

لكن كان أمر الحركة هذه محيراً لاتباع أرسطو ! لقد بقي الأمر كذلك حتى جاء نيوتن الذي عبر عن الحركة في قوانين علمية محكمة لا يزال المهندسون يستعملونها حتى اليوم في تصميم وبناء الآلات كما يطبقها الفلكيون في دراسة حركات الكواكب والنجوم والتوابع الصناعية . وقد وجد الفيزيائيون بعد ذلك أن قوانين نيوتن ليس إلا حالات خاصة من قوانين أشمل ، وأن قوانين نيوتن هذه صحيحة اذا كانت السرعة المدروسة صغيرة بالمقارنة مع سرعة الضوء واذا كان مجال تطبيق الظاهرة

كبيراً بالمقارنة مع الذرة ، وعلى الرغم من ذلك تشكل قوانين نيوتن جزءاً حياً وفعالاً من علمنا الفيزيائي المعاصر ؛ إذ لم يضمها التطور المعاصر في المتاحف . وإذا كانت الحركة جزءاً هاماً من عالمنا، وجب علينا استعراض قوانين نيوتن فيما يلي :

١ - يبقى أي جسم على حالته من السكون أو الحركة المنتظمة ما لم تؤثر عليه قوة ما .

٢ - يكون التغير في سرعة الجسم في اتجاه القوة المؤثرة عليه ، أما مقدار التغير فيتناسب طردياً مع القوة المؤثرة ومع الزمن الذي جرى خلاله التأثير ، وأخيراً يتناسب مقدار التغير عكساً مع كتلة الجسم .

٣ - عندما يؤثر جسم ما بقوة على جسم آخر ، فإن الجسم الآخر بدوره يؤثر على الأول بقوة تماكس القوة الأولى بالاتجاه وتساويها بالشدة .

يضاف إلى قوانين نيوتن هذه ، قانون الجاذبية العام :

٤ - تتجاذب أية ذرتين من المادة بقوة محمولة على المستقيم الواصل بينهما وتناسب شدتها طردياً مع كتلتي الذرتين وعكساً مع مربع المسافة الفاصلة بينهما .

لقد أحدثت قوانين نيوتن ثورة علمية وفلسفية ، فبواسطتها اختزل لابلاس المجموعة الشمسية إلى آلة مفهومة ، وهي التي شكلت القاعدة الأساسية للطيران والصواريخ . وكذلك علم الفلك ، وعلى الرغم من ذلك بقيت قاصرة عن الإجابة على أسئلة تتعلق بالحركة طرحها أرسطو . لقد حلت قوانين نيوتن مشاكل الحركة كما عرفها نيوتن وليس كما استخدم الكلمة قدماء اليونانيين في القرن الرابع قبل الميلاد أو ما تنطوي عليه من معاني في لغات القرن العشرين .

تستجيب اللغات المستخدمة لحاجتنا اليومية ، أو لربما تمت

صياغتها استجابة الحاجات أجدادنا . اننا لا نستطيع استخدام كلمة منفصلة لكل شيء أو موضوع إذ لو فعلنا ذلك لقبعنا نخترع الكلمات الى الأبد ، وهذا يصبح الاتصال مستحيلا . وإذا رغبنا بامتلاك لغة على الإطلاق فليتنا أن نستخدم كلمة واحدة للدلالة على أشياء أو حوادث عديدة .. وهكذا فمن الطبيعي أن نقول أن الرجال والجيلاد ترفض (على الرغم من أننا نفضل أن نقول أن الجيلاد تمدو) ، وكذلك نجد من الملائم أن نقول أن محرك السيارة يتحرك وأن السيولة المالية في المصرف تتحرك .

تتعلق وحدة هذه المفاهيم بلغاتنا الانسانية وببندو بعيدة من أي مماثل فيزيائي يمكن العلم أن يتنوله بسهولة وبدقة . فمن الجنون أن نبعث من نظرية علمية بسيطة ومتسقة تفطي جريان الماء في الأنابيب وجري المعدالين في حلبة السباق . ولعله جنون آخر أن نبعث من نظرية علمة تفطي كل الحركات التي احدث عنها أرسطو أو كل أنواع الاتصالات والمعلومات التي اكتشفها الفلاسفة فيما بعد .

نستخدم في لغتنا اليومية الكلمات بشكل يلائم أفعالنا اليومية . لا يسمى العلم لدراسة الكلمات وعلاقتها إلا في مجال دراسة اللغة بعد ذاتها ولكنه يبحث بالتفصيل في ظواهر الطبيعة ، بما فيها طبيعتنا الانسانية ونشاطاتنا ، ويعاول تجميعها في زمر قابلة للفهم . ينطوي هذا الفهم على قابلية تمييز القواسم المشتركة بين الحوادث المتباعدة (مثلا حركة الكواكب في السماء وحركة المنزلج على الجليد) وكذلك على وصف سلوك الظواهر بدقة وبساطة .

تنتمي المصطلحات العلمية الى قاموس كلمائنا الميومية . لقد استخدم نيوتن كلمات : القوة ، الكتلة ، السرعة ، والجاذبية .. وعندما تستخدم الكلمات لأغراض علمية تعطي عادة معنى خاصا ، وفي بعض الأحيان معنى جديدا . اننا لا نستطيع التحدث بلغة نيوتن من قوة الظروف أو كتلة الجماهير ، وأخيرا من جاذبية بريجيت باردو ، وبالمثل علينا أن نتوقع أن نظرية الاتصالات لن يكون بمقدورها الإجابة وبشكل معقول عن كل سؤال نوصفه متضمنا كلمة الاتصالات أو المعلومات .

لا تقدم النظرية العلمية الصحيحة إلا نادراً ، ان قلعت على الإطلاق،
الحلول المرجوة للمشاكل الملحة التي نطرحها بشكل متكرر ، انها لا تعطي
الاجوبة عن تساؤلاتنا إلا في حالات قليلة ، وهكذا فعوضاً عن عقلنة
افكارنا ، تقوم تلك النظرية بنبلها ، لو تتركها في احسن الاحوال كما
هي . نطلعنا النظرية الصحيحة وبشكل متجدد على جوانب خبراتنا
التي يمكن فهمها ببساطة وربطها ببعضها بشكل فعال . سنسمى في هذا
الكتاب وراء الأفكار المتعلقة بالاتصالات والتي يكمن ربطها وفهمها على
ذلك النحو .

كيف نستطيع الحصول على نظرية تتعلق بمواضيع خبراتنا ، يتحقق
انا ذلك عندما نتمكن من عزل اجزاء من خبراتنا قابلة للربط ببعضها تم
تقوم بتشريحها وفهمها وتوحيدها . تشكل قوانين نيوتن جزءاً هاماً من
الفيزياء النظرية ندعوه الميكانيك ، وهي لا تغطي النظرية بأكملها بل هي
في واقع الامر قاعدة لها ، كفرضيات الهندسة بالنسبة لجسم الهندسة
ككل . تضم النظرية الفرضيات نفسها الى جانب كل التفاصيل الرياضية
والاستنتاجات المنطقية التي تترتب بشكل ملزم على الفرضيات . يتوجب
على هذه النتائج أن تتناغم مع ظواهر العالم المقيدة حولنا كي تتحقق
صحة النظرية . ان النظرية غير الصحيحة عديمة الفائدة .

تقرر فرضيات وأفكار النظرية بشمولها ، أي مدى الظواهر التي
تغطيها . وهكذا فتقوانين نيوتن للحركة والجاذبية علمة جداً ، فهي تفسر
حركة الكواكب وخصائص النواص الضابط للوقت وميزات كل انواع
الاتالات والآليات . إلا ان هذه القوانين تعجز عن تفسير امواج الراديو .

اعلن جيمس كلارك ماكسويل عام ١٨٧٢ من خلال كتابه : الكهربائية
والمغناطيسية ولأول مرة القوانين الطبيعية التي تربط الحقل الكهربائي
والحقل المغناطيسي والتيار الكهربائي ، وبين وجود امواج كهرومغناطيسية
(امواج راديو) تنحل بسرعة الضوء . اثبت هرمتز ذلك فيما بعد بشكل
تجريبي ونعلم اليوم أن الضوء هو امواج كهرومغناطيسية . تمثل معادلات
ماكسويل التعبير الرياضي من نظريته في الكهربائية والمغناطيسية وهي

الأساس المتين لكل الأبحاث الكهربائية . تؤكد ان معادلات ماكسويل تحمل طبيعة عامة جداً ، فهي تفسر كل الظواهر الكهربائية غير الكوانتية . يتناول فرع من النظرية الكهربائية ، يدعى بنظرية الشبكات ، كل الخصائص الكهربائية للدارات الكهربائية أو الشبكات والتي يمكن الحصول عليها بربط ثلاثة أنواع من العناصر الكهربائية النموذجية : المقومات (وهي أجهزة مثل ملفات من أسلاك رفيعة قليلة الناقلية أو رقائق من المعدن أو الفحم تمييق مرور التيار) والمعرضات (وشائع من أسلاك نحاسية تلف أحيانا على نوى مغناطيسية) والمكثفات (صفائح رقيقة من المعدن تفصلها مادة عازلة كالليكا أو البلاستيك ، وكانت فارودة لايدن المثلل المبكر للمكثفة) . يقول الفيزيائي إن نظرية الشبكات أقل عمومية من معادلات ماكسويل ، لأن الأولى تتناول الخصائص الكهربائية لبنى فيزيائية خاصة نموذجية ، بينما تتناول معادلات ماكسويل الخصائص الكهربائية لأي جملة فيزيائية بما في ذلك تلك البنى الفيزيائية الخاصة والنموذجية وايضاً امواج الراديو التي تقع خارج دائرة نظرية الشبكات .

وهكذا ، فإن النظرية الأكثر عمومية والتي تفسر اكبر قطاع من الظواهر هي النظرية الأقوى والاميز ويمكن تخصيصها على النوام بهدف الانتقال الى الحالات الأبسط . وهذا ما دها الفيزيائيين للبحث عن نظرية المجال الموحد التي تضم قوانين الميكانيك والجاذبية والكهرطيسية . يبدو جلياً أنه يمكن ترتيب كل النظريات في تسلسل وفق عموميتها . وإذا كان الامر كذلك فمأهو موقع نظرية الاتصالات في مثل هذا التسلسل .

إن الحياة ليست لسوء الحظ على هذه الدرجة من البساطة ، فمن وجهة النظر المطروحة تبدو نظرية الشبكات أقل عمومية من معادلات ماكسويل ، ومن وجهة نظر أخرى هي أكثر عمومية ، ذلك لأن كل النتائج الرياضية المترتبة عليها ممكنة التطبيق في كل الجمل المهترئة البنية من مركبات ميكانيكية كما هي مطبقة في دراسة وصلات العناصر الكهربائية النموذجية . نجد بناء على ذلك المقابلات التالية : التلخيص في الميكانيك

يقابل الكثافة في الكهرباء ، والكتلة تقابل المحرض ، بينما المخمدات ، كتلك التي تراكب على الأبواب لمنع إنصافاتها تقابل المقلومة . كان من الممكن في واقع الأمر تطوير نظرية الشبكات للدراسة الجمل الميكانيكية ، وهي تستخدم فعلا في دراسة الصوتيات . أما لهذا نشأت نظرية الشبكات من دراسة العناصر الكهربائية النموذجية ولم تنبثق عن دراسة الجمل الميكانيكية ، فالإجابة عن ذلك تكمن في السياق التاريخي وليس بالضرورة الملزمة .

نقول ان نظرية الشبكات هي بمعنى ما أكثر عمومية من معادلات ماكسويل ، فلأخيرة لا يمكن تطبيقها على الجمل الميكانيكية ، بينما الأولى تغطي قطعاً من الجمل الميكانيكية النموذجية والخاصة وقطعاً مناظراً من الجمل الكهربائية النموذجية والخاصة . إلا أنه ومن جانب آخر تبدو معادلات ماكسويل أكثر عمومية من نظرية الشبكات فهي تنطبق على كل الجمل الكهربائية وليس فقط على صنف من الدارات الكهربائية النموذجية الخاصة .

يتوجب علينا الى حد ما قبول هذا الأمر ببساطة دون ان يكون بمقدورنا شرح الحقيقة بشكل كامل ، ولكن يمكن ان نقول ان هذا كثير . ان بعض النظريات هي نظريات فيزيائية كقوانين نيوتن ومعادلات ماكسويل ، حيث تتناول الأولى الظواهر الميكانيكية بينما تعنى الثانية بالظواهر الكهرومغناطيسية . اما نظرية الشبكات فهي بالضرورة نظرية رياضية ، وبذا يمكن ان تمثل رموزها معاني فيزيائية متباينة تتناول الظواهر الميكانيكية مثلما تتناول الاهتزازات الكهربائية .

تمثل النظرية الرياضية في اغلب الاحيان نظرية او جملة نظريات فيزيائية ، إذ يمكنها ان تكون الصياغة الرياضية المتسقة والتي تهدف معالجة جوانب محددة من نظرية فيزيائية عامة . تندرج نظرية الشبكات في هذا الاطار فهي في واقع الأمر الجهاز الرياضي اللازم للدراسة مسلك فيزيائي معين مشترك بين الجمل الميكانيكية والكهربائية ، في حين يعالج فرع من الرياضيات يُعرف باسم نظرية الكمون مشاكل مشتركة بين

الحقول الكهربائية والمغناطيسية والجاذبية وإلى حد ما علم الديناميكا الهوائية . تبدو بعض النظريات ، على كل حال ومن النظرة الأولى رياضية أكثر منها فيزيائية .

نستخدم الكثير من هذه النظريات الرياضية في تعاملنا مع العالم الفيزيائي . والحساب واحد من هذه النظريات . فلذا أشرنا (لعنصر من مجموعة) من التفاح ، أو الكلاب أو الرجال بالرمز ١ ، ولعنصر آخر بالرمز ٢ ، وهكذا ، وإذا استنفدنا بهذه العملية كل الأعداد الطبيعية حتى العدد ١٦ ومتضمناً إياه ، فلننا نشعر بثقة كاملة أنه يمكننا تقسيم المجموعة إلى مجموعتين جزئيتين تحتوي كل منهما على ٨ عناصر ($٨ = ٢ + ٦$) وأن العنصر يمكن ترتيبها في مربع مقسوم إلى صفوف من المربعات الصفرة يحتوي كل منها على أربعة مربعات (لأن ١٦ هو مربع كامل : $٤ \times ٤ = ١٦$) . وإذا حولنا أكثر من ذلك نصف التفاحات أو الكلاب أو الرجال بكل الأشكال الممكنة لحصلنا على جملة من المتسلسلات الثابتة يبلغ عددها ٢٠٩٢٢٧٨١٦٨٨٠٠ متسلسلة وهذا العدد يقابل عدد الامكانات التي نستطيع وفقها كتابة الأعداد من ١ إلى ١٦ بأوضاع مختلفة من حيث جوارها لبعضها . أما إذا استنفدنا في عملياتنا كل الأعداد الطبيعية حتى العدد ١٣ فقط ومتضمناً إياه ، كنا على ثقة كاملة بأن المجموعة يستحيل تقسيمها إلى مجموعات جزئية متساوية لأن العدد ١٣ هو عدد أولي ولا يمكن التعبير عنه كجداء لأعداد أخرى .

لا يعتمد كل ما تناولناه على طبيعة الأشياء موضوع البحث . فلذا ربطنا عناصر مجموعة ما من الأشياء مهما اختلفت طبيعتها بالأعداد الطبيعية ، لما تغيرت النتائج التي نحصل عليها إذا طبقنا عمليات الجمع ، أو الطرح ، أو الضرب ، أو القسمة ، أو حتى إذا رصفنا الأعداد بأوضاع مختلفة . تبدو العلاقة بين الأعداد ومجموعات الأشياء طبيعية جداً للدرجة أننا نستطيع تجاوز حقيقة أن الحساب إن هو إلا نظرية رياضية يمكن تطبيقها على الظواهر الطبيعية في حدود التقابل الممكن بين خصائص الأعداد وظواهر العالم الفيزيائي .

يطلبنا الفيزيائيون على حقيقة هامة مفادها انه يمكننا الحديث عن مجموع الجسيمات الأولية المنتمة لزمرة معينة ، كالالكترونات مثلا ، إلا انه يستحيل ان تربط الاعداد بشكل مفصل لعناصر تلك الزمرة إذ ان الجسيمات الأولية من نفس النوع لا يمكن تمييز افرادها بعضها عن بعض ، وهكذا يستحيل ان نتحدث عن رصف الافراد من نوع واحد من الجسيمات الأولية وباشكال مختلفة كما فعلنا في حالة الاعداد . يترتب على ذلك نتائج هامة في فرع من الفيزياء يدعى بالفيزياء الاحصائية . وعلينا ان نلاحظ ايضا انه في حين ان الهندسة الاقليدية هي نظرية رياضية تخدم المساحين والملاحين وبشكل فعال في مشاكلهم العملية ، فلنا نعتقد بشكل جازم ان هذه الهندسة غير دقيقة بما يكفي لتوصيف الظواهر الفلكية .

كيف يمكن ان نصنف النظريات ؟ نستطيع الحديث عن نظرية معينة على انها ضيقة للغاية او شديدة العمومية في مجال تطبيقها . يمكننا كذلك تمييز النظريات بكونها فيزيائية او رياضية ، فالنظرية الفيزيائية هي تلك التي تصف وبشكل كامل مجالا معيناً من الظواهر الفيزيائية ، وهي ظواهر محدودة على الدوام من الناحية العملية . تصبح النظرية أكثر تجريداً ورياضية عندما تتناول صفاً منمذجاً من الظواهر أو بعض جوانب الظواهر .

تعد قوانين نيوتن نظريات فيزيائية لأنها تقدم وصفاً كاملاً للظواهر الميكانيكية كحركات الكواكب أو اهتزازات النواس ، اما نظرية الشبكات فهي أقرب الى مجال الرياضيات أو التجريد ذلك لأنها تصلح لمعالجة أنواع مختلفة من الظواهر الفيزيائية النموذجية . يعد علم الحساب رياضياً وبالغ التجريد ، انه يغطي انوعاً عديدة من العناصر الفيزيائية ، الى جانب امكانية استخدامه لعد التكاليل ولعد الرجال وكذلك لعد الالكترونات (لنذكر ان الالكترونات غير قابلة للتمييز بين بعضها) . وأخيراً يصلح علم الحساب لرصد عدد الأيام الماضية .

تندرج نظرية الاتصالات وفق هذه الأطر في عداد النظريات الرياضية

الشديدة العمومية ، وعلى الرغم من انها اثبتت اصلاً من دراسة الاتصالات الكهربائية ، فهي تتناول القضايا بأسلوب مجرد وطريقة معقدة . وهي تقدم في واحدة البيت (Bit) مقياساً شاملاً للكم المعلوماتي بدلالة الاختيار أو الريبة . تنطوي واحدة البيت المعلوماتية على تحديد أو معرفة الخيار بين بدلين متساويي الاحتمال كرقمين أو رسالتين قيد الإرسال . نطلعنا نظرية الاتصالات على عدد واحدات البيت المعلوماتية التي يمكن إرسالها في كل ثانية عبر اقنية اتصال نموذجية أو غير كاملة وذلك بدلالة التوصيف المجرد لخصائص هذه الاقنية . نطلعنا نظرية الاتصالات كيفية قياس السرعة التي يولد وفقها مصدر مرسل (كمدىاع أو كاتبة) المعلومات المختلفة ، وطلعنا هذه النظرية ايضاً كيف نرسم أو نمثل الرسائل من مصدر مرسل بكفاءة تسمح ببثها عبر قناة من نوع خاص ككادرة كهربائية وكذلك تلفت نظرتنا الى طرائق تحاشي الأخطاء في الإرسال .

يبدو أحياناً استخدام الفهم الذي توفره لنا نظرية الاتصالات في مجال مسألة خاصة عملية أمراً صعباً ، ذلك لأن هذه النظرية تعرض لمختلف القضايا في عبارات علمية ومجردة ومع ذلك تكون نظرية الاتصالات ذات طابع مجرد ورياضي عام يجعل مجال تطبيقها واسماً . ولنظرية الاتصالات فوائد جمة فيما يتعلق باللغة المنطوقة والمكتوبة ، وكذلك في الإرسال الميكانيكي للرسائل وفي دراسة خصائص الآلات وربما في السلوك البشري ايضاً . ويعتقد البعض أن لهذه النظرية دوراً كبيراً في الفيزياء على نحو سنتطرق اليه فيما بعد في هذا الكتاب .

ومهما يكن من أمر ، فنظرية الاتصالات هي ، بشكل مبدي ، كما وصفها شانون ، النظرية الرياضية للاتصالات ، إذ تصاغ فيها المفاهيم بمبارات رياضية يمكن أن ترتبط بها امثلة فيزيائية متنوعة . وعلى الرغم من قابلية استخدامها من قبل المهندسين وعلماء النفس والفيزيائيين ، تبقى نظرية الاتصالات نظرية رياضية أكثر منها نظرية فيزيائية أو نفسية أو فناً هندسياً .

ليس من السهل تقديم نظرية رياضية لصامة الناس ، ونظرية الاتصالات نظرية رياضية ، وبهذا فالادعاء بإمكانية شرحها دون اللجوء للرياضيات هو أمر (قد يدعو للسخرية) . وهكذا سيدهش القارئ عندما يواجه العلاقات والمعادلات في هذه الصفحات : انها تعرض الأفكار التي يرد وصفها بكلمات لقد ضمنت الكتاب ملحقاً رياضياً لمساعدة القارئ غير الرياضي اذا هو يرغب بقراءة المعادلات بشكل سليم .

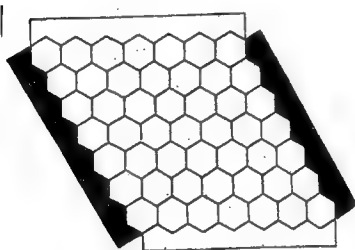
انني على دراية ، في جميع الاحوال ، بما تجلبه صور غير محبة للضرب وللتقسيم وربما للجذور التربيعية ، وايضا المعاناة المضية في الصفوف الثانية : ان مظهر الرياضيات هذا مظهر مضلل اذ انه يركز في المقام الاول على مصطلحات خاصة وحيل عملية ويضع جانباً وجه الرياضيات الاهم بالنسبة للرياضيين وربما كان القارئ قد واجه النظريات والبراهين في الهندسة او لعله لم يواجهها اطلاقاً ، ورغم ذلك تبقى النظريات والبراهين ذات أهمية قصوى في الرياضيات البحتة والتطبيقية . تلخص النتائج الهامة للنظريات المعلومات في شكل نظريات رياضية وهي نظريات لانه يمكن ببساطة البرهان على انها عبارات صحيحة .

ينطلق الرياضيون من فرضيات وتعاريف محددة ، ثم يبرهنون صحة نظريات او قضايا محددة باستخدام براهين وحجج رياضية . كان هذا ما انجزه شانون في كتابه : نظرية رياضية للاتصالات . تتوقف صحة النظريات على صحة الفرضيات والموضوعة والبراهين المستخدمة لاثباتها .

نعم ان كل ما قدمناه هو التجريد ، ولعل انجع وسيلة لايضاح معنى النظرية ومعنى البرهان هي سوق الامثلة . ولن نستطيع فعل ذلك بمطلبة القارئ غير المتخصص ان يفهم النظريات الصعبة للاتصالات الواحدة تلو الأخرى ، اذ يتطلب هذا الأمر ، في الواقع ، تركيزاً كبيراً كما يستغرق وقتاً لا بأس به حتى من قبل من كانت لديه خلفية معينة من الرياضيات . وخير ما نفعله ان نصل الى محتوى ومعنى وإهمية النظريات .

أفترض في هذا السياق اللجو على أمثلة من نظريات رياضية بسيطة وبراهينها . يتعلق المثال الأول بلعبة اسمها التعميلة ، أما النظرية المراد برهانها فتتصل على أن اللاعب الذي سيفتح اللعبة هو الفائز دون شك .

تجري اللعبة على رقعة تتكون من (٤٩) مسدساً منتظماً كما يتضح في الشكل ١ - ١ ، حيث يمكن وضع علامات عليها يستخدم اللاعب الأول علامات سودا يحاول توضعها لتكوين مسار مستمر وإن كان متعرجاً بين المساحتين السوداءين على يمين الرقعة ويسارها ، بينما يستخدم اللاعب الثاني علامات بيضاء يحاول توضعها بدوره لتكوين مسار مستمر وإن كان متعرجاً بين المساحة البيضاء في أعلى الرقعة والمساحة البيضاء في أسفلها . يلعب الخصمان بشكل متبادل ، حيث يضع اللاعب علامة واحدة خلال كل لعبة . طبعاً سيفتتح اللعبة أحد اللاعبين .



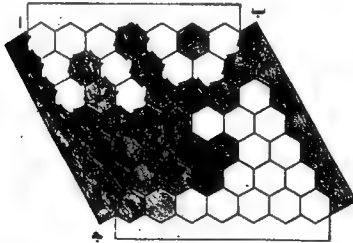
الشكل ١ - ١

لكي نستطيع أن نبرهن على أن من سيفتح اللعبة هو المنتصر ، يلزم أولاً أن نبرهن على أنه في ختام اللعبة ، أي بعد امتلاء كل خانة إما بعلامة سوداء أو بعلامة بيضاء لا بد أن يكون أحد اللاعبين قد انتصر .

النظرية : ١ : ستنهي اللعبة بفوز اللاعب الاول او اللاعب الثاني .

توضيح : يحدث في بعض أنواع اللعب ان مباراة معينة قد تنتهي بعدم فوز أي من المتبارين ، كالشطرنج مثلا حيث تنتهي اللعبة بالانسحاب ، بينما في لعبة (الطرة أو النقش) سيفوز احد اللاعبين على الدوام . وهكذا ، فلكي نبرهن هذه النظرية علينا ان نبرهن انه بتحقيق امتلاء كل خانة بعلامة بيضاء او علامة سوداء فسنحصل إما على مسار اسود بين المساحتين السوداوين يعترض أي مسار ابيض بين المساحات البيضاء او سنحصل على مسار ابيض بين المساحات البيضاء يعترض أي مسار اسود بين المساحات السوداء . بكلمة مختصرة سيفوز الابيض او الاسود ..

البرهان : نفترض ان كل خانة مسددة قد جرى املأؤها بالابيض او الاسود . لنبدأ من الزاوية اليسرى العلوية للحدود البيضاء ، أي النقطة ٢ - ١ من الشكل ١ - ٢ ونتابع الحدود بين المسدسات البيضاء والسوداء سنتحرك على الدوام على ضلع من ممدس ما بحيث يقع اللون



الشكل ١ - ٢

الأسود على يمين السائر واللون الأبيض على يسار السائر ، أن الحدود المتابعة بهذا الشكل ستعطف عند الرؤوس المتتالية للمسدسات إذا سواجه عند على رأس إحدى حالتين متباينتين فلما أن يكون هناك مسدسان اسودان متماسان على يمين السائر ومسدس أبيض على يساره كما في الشكل ١ - ٣ - د ، أو أن يكون هناك مسدسان أبيضان متماسان على يسار السائر ومسدس اسود على يمينه كما في الشكل ١ - ٣ - هـ



الشكل ١ - ٣

نلاحظ أنه في كلتا الحالتين سيتحقق وجود مسار أسود مستمر على يمين الحدود ومسار أبيض على يسارها . لنلاحظ أيضا أن الحدود لا تتقاطع ولا تنمذج مع ذاتها سواء في الشكل ١ - ٣ - د أو الشكل ١ - ٣ - هـ ذلك لأن مسارا وحيدا عبر كل رأس سيحقق وقوع الأبيض على يمينه والأبيض على يساره . سنكتشف ببساطة أن هاتين الحقيقتين صحيحتان للحدود بين المسدسات السوداء والأبيضاء وكذلك بينهما وبين حدود الرقعة وهكذا فعلى الطرف الأيسر سيقع مسار من المسدسات السوداء حتى الحافة السوداء اليسرى . ولما كان خط الحدود غير قابل للتقاطع مع ذاته فلا يمكنه الالتفاف على نفسه كقطعة مفرغة بل لا بد من أن يصل اتفاقا إلى حافة سوداء أو إلى حافة أبيضاء . وإذا وصل خط الحدود إلى حافة أبيضاء أو إلى حافة سوداء بوجود اللون الأسود على يمينه واللون

الابيض على يساره كما شرحنا ، فمن اي مكان باستثناء ب و ج يمكن ان نمد خط الحدود بوجود الاسود الى يمينه والابيض الى يساره وهناك يمكن لهذا الخط ان يصل الى احدى النقطتين ب او ج فلذا وصل الى النقطة - ب - من الشكل ١ - ٢ فان المسدسات السوداء التي تقع على يمينه وهي المسدسات المتصلة بالحافة السوداء اليسرى ستكون متصلة ايضا بالحافة السوداء اليمنى ، بينما ستتصل المسدسات البيضاء على يساره بالحافة البيضاء العلوية فقط وسيتحقق عندها فوز الاسود بلمو واضحة في هذه الحالة استحالة فوز الابيض في حالة فوز الاسود اذ ان الشريط المستمر من الخلايا السوداء المتجاورة والممتدة من الحافة اليسرى الى الحافة اليمنى سيحول دون تشكيل شريط مستمر من الخلايا البيضاء حتى الحافة السفلى وبمحاكمة مماثلة نجو ان وصول خط الحدود حتى النقطة ج يعني فوز الابيض .

النظرية : ٢ : يمكن للاعب الذي سيفتح اللعبة ان يحقق الفوز .

توضيح : نعلم بالامكانية هنا وجود طريقة للفوز يتوجب على اللاعب ان يكتشفها . تنطوي طريقة الفوز على لعبة اولى معينة ، يمكن ان يكون هناك حركات اولى غيرها ولكنها ليست ضرورية اضافة لخطوة او وصفة تحدد اللعبة الصحيحة التالية كرد على اية لعبة قد ينقلها الخصم في المراحل اللاحقة من المباراة ، اي اذ نفذ لاعبنا المعتبر عند كل دور من ادوار اللعبة المرسومة بشكل مسبق ، عندها سيحقق الفوز بصرف النظر عن ردود خصمه .

البرهان : اما ان نكون هناك طريقة ما للعب اذا اتبهما اللاعب المعتبر فسيحقق الفوز بشكل أكيد ، او انه مهما حاول من امكانات مختلفة للعباته ، فان اللاعب الآخر سيتمكن من اختيار بعض الالعبات التي ستمنعه من تحقيق الفوز ، وهكذا سيتمكن اللاعب الآخر من الفوز . نفترض ان اللاعب الآخر يمتلك وصفة أكيدة للفوز . ونذكر هنا ان اللاعب المعتبر هو الذي سيفتح المباراة وان الآخر سيكون التالي بعد الافتتاح بالنسبة

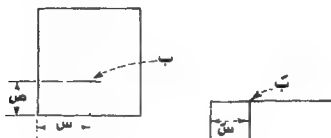
للعبته الاولى . نفرض ان اللاعب المعتبر قد افتتح المباراة بأي لعبة وان الآخر قد استجاب بلعبة مقلبة ، وبعد ذلك لجأ اللاعب المعتبر الى تطبيق وصفة الفوز الاكيد التي يعرفها اللاعب الآخر ايضا ، ولذا دعتنا حاجة تطبيق هذه الوصفة عند أي لعبة الى تغطية مسدس كان قد غطاه للتو ، نسيفطي في هذه الحالة أي مسدس آخر غير مشغول . وهكذا ستمتليء كل خانات الرقعة المدرجة في وصفة الفوز الاكيد . ان حقيقة كون لاعبنا المعتبر قد افتتح المباراة تمليه امتياز اشغال خانة اضافية من الرقعة وهذا يحول دون خصمه وتغطية خانة محددة ، في حين ان مثل هذه الاستحالة لا تنطبق على اللاعب المعتبر . وهكذا يمكن للاعبنا المعتبر ان يشغل كل الخانات الواردة في وصفة الفوز الاكيد وبالتالي يمكنه تحقيق الفوز . ان هذا يناقص فرضنا بإمكانية فوز اللاعب الآخر ، أي ان هذا الفرض بالتالي غير صحيح ، وعلى العكس فيسكون بإمكان اللاعب المعتبر ان يفوز .

يعتبر ادبائ الرياضيات المجردة ان برهاننا هذا غير دقيق بما فيه الكفاية ، ولهذا البرهان ميزة عجيبة أخرى ، فهو ليس برهاناً انشائياً أي انه لا يبين الطريقة المفصلة التي يتوجب على لاعبنا المعتبر اتباعها لتحقيق الفوز . سنسرد للتو مثالا على برهان انشائي الطابع ، ولكن علينا اولا ان نتحدث من المنظور الفلسفي من طبيعة النظريات والحاجة لبراهينها .

تنطوي الصياغة الدقيقة للمشاكل العامة او المواضيع المدروسة على النظريات الرياضية . وهكذا فحقيقة ان صاحب حركة الانفتاح في لعبة التعميدة يمكنه الفوز هي ضرورة لازمة لتكوين اللعبة وقواعدها . ان نظريات الهندسة الاقليدية ضرورة ناجمة عن الفرضيات الموضوعة .

كان يمكننا ان نرى صحة النظريات مباشرة بقليل من التأمل وامعان الفكر . يذكر التاريخ في هذا السياق ان نيوتن الشاب قد وجد نظريات اقليدس واضحة بلبائها وانه كان يتألف من قراءة براهينها .

يتوجب على الرياضيين ان يبرهنوا النظريات بغية التأكد من صحتها، هذا على الرغم من ان بإمكانهم تخمين تلك الصحة او الشك بها بشكل مسبق . لقد ادرك نيوتن نفسه أهمية البرهان وقام ببرهان عدد من النظريات باستخدام طرق اقليدس .



الشكل ١ - ٤

يتحرك الرياضيون ، على نطاق واسع ، خطوة بخطوة لتحقيق الاحاطة المعرفية بمسألة معينة . انهم يبذلون جهودا كبيرة لبرهنة نظرية تلو اخرى وولا يحاولون استكناه جملة من الامور في ومضة . وهم يفعلون ذلك ايضا بهدف اقناع الآخرين .

يحتاج الرياضي احيانا لبرهنة نظرية معينة لاقتناع نفسه بصحتها ، ذلك لان النظرية قد تبدو مخالفة للحس العام . دعونا نعتبر المسألة التالية كمثال : لدينا المربع المبين في الشكل ١ - ٤ والذي يساوي طول ضلعه ١ سم . يمكننا تحديد أي نقطة داخل هذا المربع باستخدام عددين : س : بعد النقطة المعتبرة من الضلع الايسر للمربع و ص : بعد النقطة المعتبرة من قاعدة المربع . ان كلا من هذين العددين اقل من الواحد بالطبع ، وهكذا فمن اجل النقطة المبينة على الشكل :

س = ٠.٥٤٧٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠ (عدد الاصفار العشرية لا نهاية له)

ص = ٠.٣١٢٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠ (عدد الاصفار العشرية لا نهاية له)

تقرن كل نقاط المربع مع نقاط مقابلة على المستقيم ، وهكذا فكل نقطة في المربع سيقابلها نقطة على المستقيم وكل نقطة على المستقيم سيقابلها نقطة في المربع . نقول اننا حققنا بذلك ارتساما للمربع على المستقيم وهو ارتسام من النوع المعروف بمصطلح الارتسام واحد - لواحد وذلك للسبب المبين في تعريفه .

نظرية : يمكننا تحقيق ارشام واحد - لوحد من مربع تساوي مساحته الوحدة الى مستقيم تساوي طوله الوحدة ايضا .

توضيح : لقد بسطنا هذه النظرية واعتبرنا مربعا مساحته الوحدة ومستقيما طوله الوحدة، الا ان هذه التعديلات لاعلاقة لها بصحة النظرية من حيث الاساس .

البرهان : تعتبر الأرقام التتالية المكونة لارتفاع النقطة المعتبر في المربع ص وتكون منها عددا عشريا آخر يوضع هذه الأرقام وعلى التتالي في المواقع الفردية بعد الفاصلة العشرية أي الموقع الأول والثالث والخامس وهكذا ، أما في المواقع الزوجية فنضع على لترتيب الأرقام المكونة بعد النقطة عن يسار المربع : س . نحصل بهذا التشكيل على عدد جديد س . نعتبر الآن النقطة من المستقيم التي تبعد عن يساره بالمقدار س ولتكن النقطة ب' . ان النقطة ب' هي مرسوم النقطة ب المعتبرة من المربع على المستقيم ، وهذا الارتسام هو واحد - لوحد ونبرهن على ذلك ببساطة اذ ان تغيير س أو ص سيغير س إلى عدد جديد معين ، بينما تغيير س' سيغير بالمقابل كل من س ، ص . وهكذا فلكل نقطة من المربع معرفة ببعديها س ، ص يوجد نقطة واحدة من المستقيم معرفة ببعديها عليه س' والعكس بالعكس . وهذا هو كل متطلبات ارتسام الواحد - لوحد . يتعرض هذا البرهان لبعض الصعوبات التي يمكن التغلب عليها بسهولة في حالة اعتبار بعض الأعداد الخاصة مثل $\frac{1}{2}$ في اذ يمكن كتابته على الشكل ٥٠ . حيث يتبع العدد ٥ للنهاية من الاصفار او على الشكل ٤٠ . ويتبع العدد ٤ بعدد لا نهاية له من مكرر العدد ٩ . ولو عدنا إلى مثالنا من النقطة المينة داخل المربع لوجدنا ما يلي :

$$س = ٥٤٧٠.٠٠٠.٠٠٠ .ر$$

$$س = ٢١٢.٠٠٠.٠٠٠ .ر$$

$$س = ٣٥١٤٢٧.٠٠٠.٠٠٠ .ر$$

ان سلسلة الارقام العشرية المثلثة لنقطة معينة ، في حالة معظم النقاط
المعتبرة ، لن تحول الى سلسلة من الاصفار او الى جملة مكررة من الارقام
وينطبق ذلك على النقاط المثلثة باعداد صماء .

ان مثلاً هذا هو خير مثال على برهان انشائي ، اذ استطعنا ان
نبرهن امكانية ارسام كل نقطة من مربع على نقطة مقابلة من مستقيم
باسلوب الارترسام واحد لواحد - لواحد وذلك ببساطة عن طريق التحقيق
الفعلي لهذا الارترسام . يفضل عدد كبير من الرياضيين البراهين الانشائية
على البراهين غير الانشائية ، ويرفض الرياضيون من المدرسة الحدسية
البراهين غير الانشائية فيما يتعلق بالمجموعات اللانهائية ، حيث يستحيل
تفحص كل عناصر المجموعة بشكل فردي بحثا عن خاصية معينة .

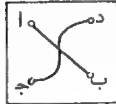
نعتبر الان قضية اخرى ذات صلة بارترسام نقاط المربع على نقاط
المستقيم . نتصور ان مؤشر يتحرك على طول المستقيم وان مؤشرا آخر
يتحرك على المربع ليشير بشكل آني الى النقطة من المربع المقابلة للنقطة
من المستقيم حيث يمر المؤشر الاول . يمكننا ان نتصور (خلافا لما سنقوم
ببرهانه) ما يلي : اذا حركنا المؤشر الاول ببطء ونعومة فسيتحرك المؤشر
الثاني ببطء ونعومة ايضا ، وهكذا فكل تجمع من النقاط على المستقيم
يشغل حيزا صغيرا يوجد تجمع مقابل من النقاط يشغل حيزا صغيرا من
المربع . اذن لو حركنا المؤشر الاول مسافة ضئيلة على المستقيم لتحرك
المؤشر الثاني مسافة ضئيلة مقابلة على سطح المربع ولو صغرنا المسافة
على المستقيم لصغرت بالمقابل المسافة المقابلة من سطح المربع ، وهكذا .
لو كان ذلك صحيحا لوصفنا ارترسام نقاط المربع على نقاط المستقيم بانه
ارترسام مستمر .

الا ان الحقيقة هي خلاف ذلك ، فارتسام نقاط مربع على نقاط

مستقيم لا يمكن أن يكون مستمرا بحال من الأحوال . فعندما نتحرك بنعومة وبشكل مستمر على تقاطع منحن داخل المربع ، تتحرك النقاط المقابلة على المستقيم بشكل عشوائي قافزة هنا وهناك ، ولا ينطبق ذلك على الارتسام الذي قدمناه للتو ، بل على أي ارتسام واحد - لواحد من المربع على المستقيم . نستنتج من ذلك أن أي ارتسام من المربع على المستقيم هو ارتسام غير مستمر .

نظرية : أن أي ارتسام واحد - لواحد من مربع على مستقيم هو ارتسام غير مستمر بالضرورة .

البرهان : نفرض أن الارتسام واحد - لواحد المعنى هو ارتسام مستمر . إذا كان هذا الأمر صحيحا إذن لوجب أن ترسم الخنقاط من منحن = اختياري آ ب داخل المربع من الشكل ١ - ٥ على النقاط من المستقيم الواقعة بين الرسمين آ ، ب . أما إذا لم يتحقق ذلك إذن لحدث أثناء حركتنا عبر المنحن في المربع أن نقفز من أحد طرفي المستقيم إلى الطرف الآخر (ارتسام غير مستمر) أو نمبر نفس النقطة من المستقيم مرتين (ارتسام غير محقق للشرط الأساسي للارتسام المفترض : واحد - لواحد) . نختار الآن نقطة حـ إلى يسار القطعة المستقيمة آ. ب ونقطة دـ إلى يمينها ومن ثم نحدد النقاط المقابلة حـ ، د داخل المربع .



الشكل ١ - ٥

نرسم المنحني الواصل بين ح ، د والقاطع للمنحني الواصل بين
٢ ، ب . يتقاطع هذان المنحنيان في نقطة مرتسما على المستقيم يقع
بين النقطتين ٢ ، ب' ، اما بقية النقاط من المنحني ح د فيجب ان
ترسم على تقاطع تقع خارج القطعة المستقيمة ٢ ب' وهذا خلاف فرضنا
ان الارترسام مستمر . اذن فالارترسام غير مستمر وهو المطلوب .

سنجد فيما بعد ان لهاتين النظريتين اهمية خاصة في نظرية
الاتصالات ، ونعني نظرية ارترسام نقاط المربع على نقاط المستقيم وفق
ارترسام واحد - لواحد ونظرية كون هذا الارترسام غير مستمر . وهكذا
استطعنا برهان نظريتين مفيدتين لنا فيما بعد بخلاف لعبة التعميلة .

ان الرياضيات هي طريقة الاكتشاف ، خطوة بخطوة ، لكل الحقائق
المتضمنة في صياغة المسائل والتي لا تبدو واضحة للوهلة الاولى . يعني
تطبيق الرياضيات ان يستشف المرء اولا الحقائق بشكل حدسي ثم يعمد
الى اثباتها بالبرهان . نصل هنا الى عقدة إشكالية ، فالبراهين التي
اقتنعت قدماء الرياضيين أصبحت غير مرضية بالنسبة للرياضيين
المحدثين .

لقد عبر رياضي معاصر مغمور ونزق ، كان قد راجع أبحاث شاقون
في نظرية الاتصالات ، عن شكوكه فيما اذا كان المفزى الرياضي لهذه
الابحاث جديراً بالاحترام . تبقى نظريات شاقون على الرغم من ذلك
صحيحة وقد توفرت لها البراهين المقنعة لأكثر الرياضيين صلابة . ان
البراهين التي قدمتها حتى الآن كبيان وعرض للرياضيات معرفة للنقد
أكثر من غيرها من قبل دعاة الرياضيات البالغة التجريد .

لقد كان جل ما فعلته الإشارة الى طبهة المحاكمات الرياضية اضافة
لاملاء فكرة من ماهية النظرية وطريقة برهانها . سننطلق ، وكل ذلك
في جعبتنا الى النظرية الرياضية للاتصالات بكل نظرياتها والتي لن نعمد
الى برهانها فعلا اضافة لبعض التضمينات والاربطات التي تمتد وراء
كل ما يمكننا برهانه بيقين رياضي .

تتناول نظرية الاتصالات كما اعطانا اياها شانون وكما سبق وقدمت في هذا الفصل مسائل هامة معينة للاتصالات والمعلومات ، ويتسم هذا التناول بكونه شاملاً ومجرداً ، الا ان هذه النظرية غير قابلة للتطبيق على كل ما يمكن صياغته باستخدام كلمتي الاتصالات والمعلومات بمعناها المتداول . تحيط نظرية الاتصالات بكل جوانب الاتصالات التي يمكن تنظيمها وتجميعها بشكل مفيد ومثمر ، تماماً كما تعالج قوانين نيوتن الحركات الميكانيكية فقط باكثر مما تعنى بكل الظواهر المتباينة والمهمة والتي كانت في ذهن أرسطو عند استخدامه لكلمة الحركة .

يحاول العلم ، في سعيه الى النجلى ، التعامل مع المعكن . اننا نجد ما يدعونا للاعتقاد ان بإمكاننا توحيد كل الاشياء والمفاهيم التي نستخدم للدلالة عليها نفس الكلمة ، والاجدى ان نسمى الى جوانب الخبرة التي يمكن ربطها ببعضها ، واذا نجحنا في هذا الربط لاصبحنا امام نظرية . ان قوانين نيوتن هي نظرية يمكننا استخدامها في التعامل مع الظواهر الميكانيكية ، بينما معادلات ماكسويل هي نظرية تتناول الظواهر الكهربائية ، واخيراً نستخدم نظرية الشبكات في مجال أنواع بسيطة وخاصة من الاجهزة الميكانيكية والكهربائية . يمكننا استخدام علم الحساب بشكل هام جداً لعد الناس ، الاحجار أو النجوم ، بينما نطبق الهندسة لقياس الأرض ، البحر ، أو المجرات .

ان نظرية الاتصالات هي نظرية مجردة بمعنى انها تنطبق على أنواع متنوعة من الاتصالات : المكتوبة ، الصوتية ، أو الكهربائية وذلك بخلاف قوانين نيوتن للحركة ومعادلات ماكسويل والتي هي نظريات فيزيائية بمعنى انها ترتبط بصنوف معينة من الظواهر الفيزيائية . تعنى نظرية الاتصالات بجوانب هامة ومجردة من الاتصالات ، وهي تنطلق من فرضيات محددة وواضحة لتصوغ نظريات تتعلق بمصادر المعلومات واقنية الاتصالات . انها بهذا المعنى نظرية رياضية ، ولفهمها ، يتوجب علينا اولاً ان نفهم فكرة النظرية على انها العبارة التي تتطلب البرهان اي كونها نتيجة لازمة لمجموعة من الفرضيات الاولية . ان هذه الفكرة هي قلب الرياضيات كما يفهمها الرياضيون .



الفصل الثاني

أصول نظرية المعلومات

لقد كان الناس دائماً على خلاف فيما يتعلق بقيمة التاريخ فلقد درس بعضهم الاحقاب الغابرة في محاولة استشفاف نظام شامل للعالم يستطيع أن يستجلي بين ثنياه المستقبل والماضي على السواء بينما رأى الآخرون في الماضي وصفات ناجعة للنجاح في الحاضر وهكذا يعتقد البعض أننا بدراسة الكشوف العلمية في وقت ما يمكننا أن نتعلم الاستكشاف بينما يشير أحد الحكماء إلى أننا لا نتعلم أي شيء من التاريخ ما عدا أننا لا نتعلم أبداً أي شيء من التاريخ ، بينما يؤكد هنري فورد أن التاريخ مجرد هراء .

يقع كل ذلك أبعد مما أرمي إليه وأبعد من أهداف هذا الكتاب إلا أنني سأظل متمسكاً بأن بإمكاننا أن نتعلم أمرين على الأقل من تاريخ العلم .

أولهما أن أهم الكشوف العلمية وأقواها لم تنبثق من خلال دراسة الظواهر كما تحدث في الطبيعة وإنما من خلال دراسة الظواهر فيما صنعه الإنسان وفي المنتجات التكنولوجية إذا صح التعبير ، ذلك أن الظواهر في أدوات الإنسان مبسطة ومرتبطة بالمقارنة مع تلك التي تقع في الطبيعة وهذه الظواهر المبسطة هي التي يسهل فهمها على الإنسان .

لذا فإن وجود الآلة البخارية أعطى دفعا قويا لظهور علم الديناميكا الحرارية (الترموديناميك) ، وتتجلى في الآلة البخارية ظواهر الحرارة

والضغط والاستبحار والتكلف بشكل بسيط ومربى واننا نلاحظ ذلك بشكل خاص في اعمال كارنو . وكان كارنو (١٧٩٦ - ١٨٣٢) اول من اقترح التمدد المثالي للغازات (دورة كارنو) وربط به امكان استخلاص اكبر كمية ممكنة من الطاقة الميكانيكية وذلك من مجمل طاقة البخار المتوفرة . اما معلوماتنا عن علمي تحريك السوائل والغازات فقد تراكمت اثر اختراع الطائرات والسفن وليس بسبب وجود الطيور والاسماك .

واخيراً استعلمنا معرفة الكثير من الكهرباء من خلال الاختراعات الانسانية دون اللجوء الى البروق والصواعق .

وسنجد بشكل مقابل تماماً ، جذور نظرية شانون الانيقية والرحبة في الاتصالات عبر المظاهر المبسطة والمفهومة والمرتبطة بالثب البرقي .

يعلي التاريخ علينا درسه الثاني موضعاً الصعوبات الجمة التي يدفعها الانسان ثمناً للمعرفة والفهم . تبدو قوانين نيوتن في عصرنا بسيطة لا مناص من اللجوء اليها على الدوام ، الا انها كانت في يوم من الايام مجرد حلم عجز امله اكثر الرجال عبقرية وابداً . ان المكتشفين انفسهم يبدون في كثير من الاحيان مشتتين بشكل ملفت للنظر حقاً . يتوقع احداً مثلاً ان يجد في بحث ماكسويل عن الكهربائية والمغناطيسية اعلاناً بسيطاً وجريئاً حول القفزة النوعية التي حققها ، على العكس ، ان بحث ماكسويل ذلك تكتنفه الغوضى وتتداخل فيه امور صغيرة بدت في يوم من الايام على قدر من الاهمية بحيث ان اكثر القراء تخصصاً سيسعطر للبحث طويلاً عن الاكتشاف الجديد واعادة صياغته على الشكل البسيط المألوف لديه . الا ان ماكسويل كان قد ثبت قضيته بشكل واضح في مخطوطة اخرى .

وهكذا يقدم لنا تمحيص اصول الافكار العلمية فائدة جمة فيما يتعلق باجراء التقييم الحقيقي للجهود التي وظفت بغية الظفر بالمعارف والافكار الجديدة . لقد كان منظر مالوفاً في الايام الغابرة ان نرى المفكرين

يحمون حول حواف المكتشفات الجديدة دون أن يكون بإمكانهم تنفيذ الخطوة النهائية . نشعر في كثير من الأحيان أننا يجب أن ننوب منهم بالكلام ونؤكد أنهم وصلوا فعلاً إلى النتائج النهائية المتوخاة كونهم قد استطاعوا وصف الكثير من الأفكار المبتغاة وفق النسق لصحيح . ولعله أمر متواتر أن يقع الكثير من الرافضين في فخ مماثل أثناء حياتهم ، فعدد لا بأس به ممن استطاعوا حل مشاكل لم يكن لديهم عنها من معطيات في البداية إلا أفكار ضئيلة ، اعتقدوا فيما بعد أنهم احاطوا بالموضوع وبكل جوانبه وتفصيله .

لذا فالنتيجة المحتملة أن العودة إلى أصول الفكرة تساعد في فهم محتوياتها ، وفي مقدمة تلك الأصول ماذا كانت درجة فهم الموضوع قبل انبثاق الفكرة وكيف تم تحقيق الوحدة والوضوح بعد ذلك . إلا أن تحقيق الفهم الصحيح يتطلب منا متابعة المسار الفعلي للاكتشافات ، وليس المسار الذي نشعر أن الكشوف العلمية كان من الممكن أو من الواجب أن تسير وفقه ، كما أن علينا أن نقف من المشاكل (إذا استطعنا ذلك) كما وقف منها المكتشفون الأوائل لا كما نراها اليوم .

إن التطلع إلى معرفة أصول نظرية المعلومات يدفعنا إلى متاهات لا نهاية لها كان من الممكن لي أن اتحاشاها بكل سرور ، إلا أن الآخرين يدفعون قرائهم على الدوام للدخول فيها . وكل ما أرجوه أن نخرج منها بدون آثار سلبية تذكر سيما أننا سنعرض للموضوع وفق التسلسل التالي .

يستخدم علماء الديناميكا الحرارية والميكانيك الاحصائي مصطلحاً خاصاً هو الانتروبي ، كما تستخدم نظرية الاتصالات كمية تسمى الانتروبي ، ونوه هنا إلى قدم العلمين الأولين بالمقارنة مع نظرية الاتصالات . لقد استخدم الفيزيائي ل. سزيلارد في بحث له عام ١٩٢٩ مفهوماً معلوماتياً معيناً لتحليل تناقض فيزيائي . نخصص من هذه الحقائق إلى نتيجة مفادها أن نظرية الاتصالات قد نشأت بشكل ما من الميكانيك الاحصائي .

لقد سبب هذه الفكرة البسيطة والمضللة فوضى كبيرة حتى بين التقنيين . ان منشأ نظرية للاتصالات يعود الى المحاولات التي جرت لحل بعض المشاكل المتعلقة بالاتصالات الكهربائية ، وقد دميت الانتروبي الخاصة بها بالانتروبي بالمحاذاة الرياضية مع الانتروبي الخاصة بالميكانيك الاحصائي . تبرز الاهمية الخاصة لانتروبي نظرية الاتصالات في معالجة جملة من المواضيع مختلفة بشكل كامل عن تلك التي يتناولها الميكانيك احصائي .

تعتمد الانتروبي الخاصة بكتلة غازية في الديناميكا الحرارية على درجة حرارة الغاز وحجمه وكتلته ونوعيته تماماً كما تعتمد طاقتها على نفس العوامل . اذا وضعنا كمية من الغاز في اسطوانة مغلقة ومحكمة الا من احد طرفيها حيث يمكن المكبس ان يتحرك بحرية وتركنا الغاز يعتمد فان درجة حرارته ستتناقص ويفقد بالتالي جزءاً من طاقته الحرارية ويظهر ان هذا الانخفاض كفعل دفع على المكبس ، ويمكن لهذا العمل ان يستخدم مثلاً لرفع وزن ما ، وفي هذه الحالة سيدخر الوزن الطاقة التي فقدها الغاز .

ان هذه العملية هي عملية عكوسة ، ونعني بذلك اننا اذا بدلنا عملاً لدفع المكبس نحو داخل الاسطوانة ببطء ولضغط الغاز بالتالي حتى يستعيد حجمه الاصلي واذا ذاك يسترد الغاز طاقته الاولى وكذلك يعود الى ضغطه ودرجة حرارته الاصليين . تتميز هذه العملية العكوسة بثبات الانتروبي وتغير الطاقة خلالها .

تعتبر الانتروبي لذلك مقياساً للعكوسة ، فاذا بقيت الانتروبي ثابتة كانت العملية عكوسة ، ففي مثالنا تتحول الطاقة بشكل متكرر بين شكلها الحراري في الغاز المضغوط وشكلها الميكانيكي في الوزن المرفوع .

ان معظم الظواهر الفيزيائية غير عكوسة . يصاحب العمليات غير العكوسة ازدياد في الانتروبي .

تخيل على سبيل المثال اسطوانة محكمة لا تسمح بتسرب الحرارة منها واليها ، وقد شطرت الى جزئين . نملأ الجزء الاول بغاز ما ونترك الثاني مفرغاً تماماً . نتصور الان ان الفاصل بين الشطرين قد زال فجأة وبشكل كامل وهذا سيسمح للغاز بالانتشار داخل كل الاسطوانة وسيزيد الانتروبي الا انه سيحافظ على طاقة الغاز دون تغيير .

كان يمكننا قبل زوال الفاصل بين الشطرين الحصول على طاقة ميكانيكية من الغاز بتركه يتدفق داخل الشطر المفرغ من الاسطوانة عبر آلة صغيرة . اما بعد زوال الفاصل بين الشطرين وازدياد الانتروبي فيصبح امر الحصول على الطاقة الميكانيكية المثار اليها مستحيلاً . تزداد الانتروبي في ظروف مماثلة بينما تبقى الطاقة ثابتة ، ويحدث هذا مثلاً عندما تنتقل الحرارة من جسم ساخن الى جسم بارد ، وقبل تساوي درجتي الحرارة في كلا الجسمين يكون من الممكن الاستفادة من فرق الحرارة للحصول على طاقة ميكانيكية ، اما بعد التساوي فانه يستحيل علينا ان نحول اي جزء من الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية .

وهكذا فان ازدياد الانتروبي يعني نقصان قابليتنا لتغيير الطاقة الحرارية وتحويلها الى طاقة ميكانيكية . تقابل زيادة الانتروبي باختصار انخفاضاً في الطاقة الجاهزة .

لقد اطلقنا علم الديناميكا الحرارية مفهوم الانتروبي ، الا انه لم يعط تصوراً فيزيائياً مفصلاً لهذا المفهوم بدلالة سرعة الجزيئات ومواقعها مثلاً . يؤمن الميكانيك الاحصائي معنى ميكانيكياً مفصلاً للانتروبي في بعض الحالات الخاصة . وبصورة عامة يترافق ازدياد الانتروبي مع نقصان النظام اي ازدياد الفوضى . اما اذا سألنا ماذا نعني بالنظام ، فعلينا ان تربط النظام بشكل ما مع المعرفة . واذا تمكنا من معرفة موقع وسرعة كل جزيء ضمن تركيب جزيئي بالغا ما بلغ من التعقيد ، فسيصعب علينا اخراجه من حالة النظام اذ ذاك . تعني الفوضى في الميكانيك الاحصائي عدم قابلية التنبؤ المستندة الى فقدان المعلومات الضرورية عن مواقع وسرعة

الجزئيات . اننا نفتقد هذه المعلومات في الحالات المادية عندما يكون نظام المواقع والسرع معقدا بدرجة كبيرة .

لنعد الى مثالنا حيث حبست كل جزئيات الغاز في احدى شطري الاسطوانة المعتبرة . اذا كانت هذه الجزئيات بكاملها فعلا في ذلك الشطر واذا كنا بدورنا نعلم ذلك فان الانتروبي ستكون اقل منها في حالة انتشار الغاز في شطري الاسطوانة ، ذلك لان علمنا الاكيد بوجود الجزئيات في الشطر الاول سيؤمن لنا معرفة اكبر عن مواقع الجزئيات بالقلونة مع الحالة التي ينتشر فيها الغاز عبر شطري الاسطوانة . كلما ازدادت معرفتنا التفصيلية بجملة فيزيائية نقصت ربيتنا بها (مثلا فيما يتعلق بمواقع الجزئيات) وكانت الانتروبي بالتالي اقل . وعلى العكس تزداد الربيسة بازدياد الانتروبي .

لذا اربطت الانتروبي في الفيزياء بامكانية تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية . اذا لم تنفجر الانتروبي خلال عملية ما ، كانت هذه العملية عكوسة . واذا ازدادت الانتروبي نقصت الطاقة الجاهزة . يفسر الميكانيك الاحصائي ازدياد الانتروبي على انه نقصان في النظم او ، اذا رغبتنا ، نقصان في درجة معرفتنا .

ان تطبيقات وتفاصيل الانتروبي في الفيزياء هي اكبر مما عرضته بكثير ، ولكنني اعتقد انني استطعت ابصاح الفكرة وبعضاً من اهميتها . ننتقل الان الى الاهداف والاستخدامات الاخرى لمفهوم الانتروبي في نظرية الاتصالات .

نعتبر في نظرية الاتصالات مصدر ارسال ككتابة او مذياع ، والذي يمكنه في ظرف معين اصدار رسالة من جملة رسائل ممكنة . يرداد لكم المعلوماتي المنقول عبر الرسالة بازدياد الربيسة المتقلبة لاصدار رسالة معينة . ان الرسالة المصدرة من اصل عشرة رسائل ممكنة تنقل كما معلوماتيا اقل من رسالة منتقاة من اصل مليون رسالة ممكنة . ان الانتروبي

نظرية الاتصالات هي قياس لهذه الرتبة ، والرتبة أو الانتروبي هي معيار الكم المعلوماتي المنقول عبر رسالة من مصدر مرسل . أن ازدياد معلوماتنا عن تحديد الرسالة التي ستنشق من المصدر سيقلل الرتبة وبالتالي الانتروبي وهذا سينعكس في نقص بالكم المعلوماتي .

تترتب نتيجة هامة على ما قدمناه ، وهي أن اختلافا جليا يميز بين الافكار التي كانت وراء تطوير مفهوم الانتروبي في الفيزياء وتلك التي لعبت دورا أساسيا في تطوير مفهوم للانتروبي في نظرية الاتصالات . أن كلا من المفهومين فعال ومفيد دون ضرورة العودة الى الآخر . وعلى الرغم من ذلك فانتروبي الميكانيك الاحصائي وانتروبي نظرية الاتصالات يمكن أن يعبر عنهما بدلالة الرتبة في عبارات رياضية متشابهة . نتعامل هنا مما اذا كان ممكنا صياغة علاقة متميزة ومفيدة بين هذين المفهومين للانتروبي وأكثر من ذلك علاقة بين الفيزياء والنظرية الرياضية للاتصالات.

لقد حاول الكثيرون من الرياضيين والفيزيائيين إبراز أهمية نظرية الاتصالات والانتروبي الخاصة بها في مجال الميكانيك الاحصائي ، الا أن هذا الموضوع مازال ضبابيا وغير واضح ، وتزداد حالة التخطي في هذا الموضوع عندما يتسرب أكثر من معنى لكلمة المعلومات الى بحث ما . وهكذا تربط كلمة المعلومات بمفهوم المعرفة وفق معناه المتداول بأكثر مما تربط بالرتبة وحل الرتبة كما هو الامر في نظرية الاتصالات .

سنعرض للعلاقة بين الفيزياء ونظرية الاتصالات في الفصل العاشر بعد أن نكون قد بلغنا مستوى جيد من فهم تلك النظرية . وكل ما نستطيع قوله الآن أن المحاولات الرامية لعقد قران بين الفيزياء ونظرية الاتصالات لم تثمر ومازالت موضع اهتمام كبيرة ، إذ أن تلك المحاولات لم تتمخض عن نتائج أكيدة أو تفهم أكبر ، مقابل ما حققته نظرية الاتصالات ذاتها .

تقع أصول نظرية الاتصالات في الأبحاث الخاصة بالاتصالات الكهربائية وليس في الميكانيك احصائي ، كما أن بعض المفاهيم المرتبطة بها تعود الى ولادة الاتصالات الكهربائية .

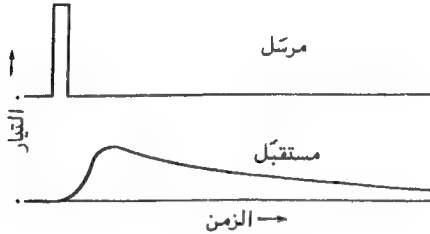
بدا صموئيل ف. ب. مورس أول جهد كبير ناجح لتحقيق الاتصالات البرقية الكهربائية عام ١٨٣٢ خلال رحلة عبر الأطلسي . لقد كانت برقية مورس الأولى اعقد بكثير مما نلم به الآن واحتوت على جملة من الخطوط الطويلة والقصيرة ، ولم تكن سلاسل الخطوط تلك ممثلة لكلمات ، بل مثلت اعدادا مرتبطة بكلمات في قاموس خاص او كتاب ترميز اكمله مورس عام ١٨٣٧ . سنرى فيما بعد ان هذه الطريقة للترميز هي طريقة فعالة حتما ، ولكنها طريقة غير مصقولة يعوزها الاتقان .

لقد اهلل مورس طريقة الترميز الاصلية هذه بينما كان يعمل في نفس الموضوع مع الفرد فيل وتم ابتكار ترميز مورس (شيفرة مورس) عام ١٨٣٨ تلك الشيفرة التي نستخدمها اليوم . تمثل الاحرف الابجدية وفق هذا الترميز بفراغات وخطوط ونقط فالخط نبضة كهربائية مديدة ، بينما النقطة نبضة كهربائية قصيرة ، واخيرا يقابل الفراغ انقطاع الموجة الكهربائية .

لقد تم مزج الخطوط والنقاط بمهارة لترميز كل الاحرف الابجدية ، مثلا بتواتر الحرف E في اللغة الانكليزية ضمن معظم الكلمات لذا اختير له اقصر رمز ممكن : نقطة واحدة . لقد تم ترميز الاحرف بصورة عامة بحيث تستخدم الرموز القصيرة للاحرف الاكثر تواترا والرموز الطويلة للاحرف الاقل تواترا . ومن الغرابة بمكان ان هذا الخيار قد تم دون الرجوع الى جداول تبين التواترات المختلفة للاحرف في نصوص اللغة الانكليزية ولم تعد الاحرف في اي نص للحصول على مثل هذه المعلومات . لقد تم الحصول على التواترات النسبية لورود مختلف الاحرف بعد مختلف المطابق في الاجزاء المختلفة لمعبة آلة كتابة .

يمكننا ان نتساءل عما اذا كان باستطاعتنا بث الرسائل باللغة الانكليزية برقيا بسرعة اكبر وذلك بلجوءنا الى ترميز الاحرف بشكل مختلف عن ترميز مورس . تجيبنا نظريتنا المعاصرة اننا لن نحقق زيادة في السرعة باكثر من ١٥ ٪ لقد كان مورس ناجحا للغاية في هذا المجال ، ولكن الامر واضحاً بعده تملأنا .

لقد قدم ترميز مورس درساً هاماً مفاده أن الطريقة التي تتم وفقاً
ترجمة الرسالة إلى إشارات كهربائية لها أهمية كبيرة ويقع هذا الموضوع
من نظرية الاتصالات في القلب .

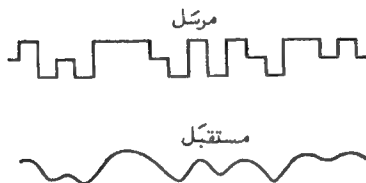


الشكل ٢ - ١

أقر الكونغرس الأمريكي عام ١٨٤٣ ميزانية خاصة لإنشاء دائرة برقيات
بين واشنطن وبالتيمور . بدأ مورس بمد الأسلاك تحت الأرض إلا أنه
سرعان ما واجه مصائب كبيرة تطورت فيما بعد للاضرار بالكابلات تحت
المائية ، فلجأ إلى حل مشكلته الآتية بمد الأسلاك على أعمدة .

لقد بقيت المصائب التي واجهها مورس في أسلاكه المحدودة تحت
الأرض بارزة كمشكلة هامة . أن الدارات المتكاثفة في نقلها للتيار الكهربائي
المستمر ليست جميعها مناسبة بنفس الدرجة للاتصالات الكهربائية .
إذا تم إرسال خطوط ونقاط بسرعة كبيرة عبر دائرة تحت أرضية أو تحت
مائية ، يجري استلامها عند الطرف الآخر في وقت واحد . يبين الشكل
٢ - ١ أنه عندما نرسل نبضة كهربائية قصيرة بشكل متواتر عبر فترات
انقطاع ، فإنها تصل الطرف الآخر من الدارة على شكل نبضة كهربائية
مستمرة ومتصلة ، وربما يتداخل هذا الإرسال الطويل مع الإرسال الخاص

برمز آخر ويحدث نتيجة للتداخل كما وان فترة انقطاع قد مرت .
وهكذا وكما يبين الشكل ٢ - ٢ ، عندما نرسل قطار من الاشارات
متميز وواضح فقد يصل الطرف الاخر على شكل موجة كهربائية مستمرة
متلوية صاعدة وهابطة وبالتالي صعبة التفسير . اذا حاولنا جعل الخطوط
والتقاط والفواصل اطول زمنا فسيصبح تيار الاستقبال تيار الارسال



الشكل ٢ - ٢

بشكل جيد ، الا ان ذلك سيبطئ سرعة الارسال . ويبدو واضحا ان
هناك سرعة حدية لارسال النقاط والفواصل لكل دائرة ارسال . تكون
السرعة منخفضة في حالة الكوابل تحت البحرية للدرجة تزعم مستخدمى
الاتصال الكهربائي ، بينما تساعدهم الاسلاك الممتدة على اعمدة بسرعة
ارسالها الكبيرة لقد تنبه المرسلون الاوائل لهذه المشكلة التي تشكل
بدورها جزءاً هاماً من نظرية الاتصالات .

يمكن ان نتحابل بأشكال مختلفة على الرغم من هذه المحدودية في
السرعة لزيادة عدد الاحرف المرسلة عبر دائرة معينة وخلال فترة زمنية

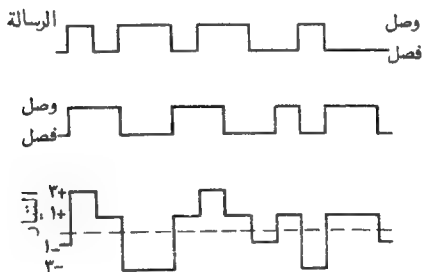
محددة . يستغرق إرسال الخط ثلاثة اضعاف المدة اللازمة لإرسال النقطة . وقد تبينت بسرعة الفوائد الحجة التي يقدمها الإرسال مزدوج التيار . يمكننا تفهم ذلك بتصوير ربط مقياس غلفاني بين نقطة الاستقبال والأرض ، والمقياس الغلفاني هو جهاز يضبط ويحدد اتجاه التيارات الكهربائية الضعيفة . يربط الموصل القطب الموجب من بطاريته إلى السلك والقطب السالب إلى الأرض ، ويتحرك بذلك مؤشر المقياس الغلفاني إلى اليمين محددا نقطة ، ولتحديد خط ، يربط الموصل القطب السالب من بطاريته إلى السلك والقطب الموجب إلى الأرض ، فيتحرك مؤشر المقياس الغلفاني إلى اليسار . نصلح بذلك على أن اتجاه التيار في جهة معينة (داخل السلك) يمثل نقطة واتجاهه في الجهة العاكسة (خارج السلك) يمثل خط ، بينما يمثل انقطاع التيار الفاصل (حالة فصل البطارية) . أما في الحالة الفعلية للإرسال المزدوج التيار فيستخدم جهاز مستقبل من نوع مختلف .

نستخدم في الإرسال وحيد التيار بمنصرين لصنع رموزنا . تيار ولا تيار ، واللذين يمكن أن نسميهما واحد وصفر ، ويقابل ذلك في حالة الإرسال مزدوج التيار ثلاثة عناصر هي : التيار الأمامي أو التيار داخل السلك ، ولا تيار ، والتيار الخلفي أو التيار خارج السلك ، ويمكن تسميتهما أيضا : + ، ١ ، ٠ ، - . نستخدم هنا اشارتي الزائد والناقص للدلالة على اتجاه التيار بينما يبين العدد ١ شدة أو قوة ذلك التيار وهو في هذه الحالة يساوي لدفق التيار في كلا الاتجاهين .

لقد ذهب توماس ادیسون عام ١٨٧٤ أبعد من ذلك . ففي نظام إرساله الرباعي استخدم شدتين واتجاهين للتيار ، وكان بمقدوره إرسال رسالة أولى بتغيير الشدة وبصرف النظر عن اتجاه التيار وإرسال رسالة ثانية بتغيير الاتجاه مهما كانت تغيرات الشدة . إذا فرضنا أن التيارات تفرق عن بعضها بدرجات متساوية ، فإنا نستطيع تمثيل الشروط الأربعة لتدفق التيار باستخدام الأعداد : + ، ٣ ، + ، ١ ، - ، ١ ، - ، ٣ . يوضح الجدول التالي تفسير ذلك عند النهاية المستقبلية من القارة .

التيار المرسل	المعنى	الرسالة الاولى	الرسالة الثانية
٢ +	مرسلة	مرسلة	مرسلة
١ +	متوقفة	متوقفة	مرسلة
١ -	متوقفة	متوقفة	متوقفة
٢ -	مرسلة	مرسلة	متوقفة

يوضح الشكل ٢ - ٣ كيف يمكن لمتتالية مكونة من اربع قيم مختلفة للتيار تمثيل الخطوط والنقاط والفواصل الخاصة برسالتين آتيتين مستقلتين .



الشكل ٢ - ٣

يتوقف الكم المعلوماتي المرسل عبر دائرة معينة ليس فقط على سرعة ارسال الرموز المتتالية (القيم المتتالية للتيار) بل أيضا على عدد الرموز المختلفة المتوفرة والتي يمكن اجراء الخيار بينها (مختلف قيم التيار) .

إذا استخدمنا كرمزين التيارين + ١ وصفر فقط أو وبنفس الكفلة
 التيارين + ١ و - ١ فأننا نستطيع أن ننقل إلى المستقبل واحدة فقط
 من امكانييتين عند لحظة معينة . لقد رأينا للتو أنه إذا أجرينا الخيار بين
 أربعة قيم للتيار (أحد أربع رموز) في وقت معين مثل : + ٣ أو + ١
 أو - ١ أو - ٣ فأننا نستطيع بقيم التيار هذه الرموز نقل معلومتين
 مستقلتين : سواء أكننا نعني صفر أو واحد في الرسالة الأولى أو إذا كنا
 نعني صفر أو واحد في الرسالة الثانية . وهكذا فإن استخدام أربعة
 قيم للتيار ، ومن أجل سرعة معينة لإرسال الرموز المتتالية ، يمكننا من
 إرسال رسالتين مستقلتين وبسرعة لكل منهما تكافئ ما تسمح لنا به
 قيمتان للتيار من سرعة في إرسال رسالة واحدة . اننا نستطيع إرسال
 ضعف العدد من الأحرف في الدقيقة باستخدام أربعة قيم للتيار بالمقارنة
 مع ما يمكننا إرساله باستخدام قيمتين للتيار .

يقود استخدام التعددية في الرموز إلى صعوبات كبيرة . لقد رأينا
 أن الخطوط والنقاط المرسلة عبر سلك تحت مائي تميل إلى الانتشار
 والتداخل . لذا فإن بحثنا عن رمز معين عند نهاية الدارة سيضعنا في
 مواجهة عدد آخر من الرموز كما يوضح الشكل ٢ - ٢ . وهكذا فالتحديد
 الأبسط في مثل هذه الحالات كالتحديد ١ وصفر أو + ١ و - ١ هو في
 واقع الأمر أسهل وأكثر تأكيداً من تحديد معقد مثل + ٣ ، + ١ ،
 - ١ ، - ٣ .

تعد أمور أخرى من قابليتنا لإجراء مفاضلات معقدة ، فمثلاً تظهر
 إشارات إضافية على خطوط الإرسال والكوابل البحرية إبان العواصف
 المغناطيسية ، إذ أن تغيرات الحقل المغناطيسي الأرضي تولد تيارات
 كهربائية في الكوابل ، وهذه التغيرات بدورها تتسبب عن الريح
 الشمسية . وإذا دققنا أكثر باستخدام المضخمات الالكترونية الحساسة،
 لاكتشفنا وجود تيارات كهربائية دقيقة وغير مستتعة بشكل دائم .
 تشبه هذه التيارات الحركية البراونية للذرات الصغيرة المشاهدة
 باستخدام المجهر وأيضا اضطرابات جزئيات الهواء وكل ما يرتبط

بدرجات الحرارة والتغيرات الحرارية . ان التيارات الدخيلة ، والتي ندموها بالضجيج ، موجودة ومهياة على الدوام لتتداخل مع الاشارات المرسله .

واذا استعلمنا تحاشي ظاهرة التداخل بين النقاط والفواصل والتي نسميها بالتداخل بين الرموز ، فان الضجيج على الرغم من ذلك سيحاول تشويه الاشارة المستقبلية ويزيد بالتالي في صعوبة التمييز بين بدائل متعددة من الرموز . لذا فان زيادة شدة الاشارة المرسله والتي تتحقق بزيادة التيار المرسل ستساعد في التغلب على الالتر الضجيج . ومهما يكن من امر فهناك حدود للطاقة الممكن استخدامها . يستلزم ارسال تيار عالي عبر كابل بحري كمونا عاليا وهذا بدوره يمكن ان يدمر عزل هذا الكابل ، بل ويمكن ان يسبب دائرة قصيرة ، ومن المحتمل ان الكمون العالي الدافع الذي استخدم عام ١٨٥٨ لفشل الرسالة البرقية الاولى في كابل عبر الاطلسي .

لقد استطاع حتى رجال البرق الأوائل ان يفهموا وبالبساطة جانباً لا بأس به من المحدودية في سرعة الارسال ، التداخل ، الضجيج ، وكذلك صعوبة التمييز بين بدائل مختلفة من قيم التيار واخيراً القيم العظمى للطاقة التي يمكن توظيفها . الا ان الحاجة كانت تقضي بتجاوز هذا الفهم البدهي للمشاكل المطروحة الى تحليل رياضي عميق لها .

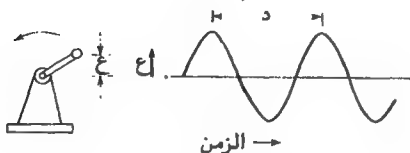
استخدمت الرياضيات منذ وقت بعيد لدى التصدي لهذه المشاكل ، الا ان الايضاح الكامل لها لم يات الا في السنوات الاخيرة . قام ويليام ثومسون (وعرف فيما بعد بلورد كلفن) عام ١٨٥٥ بحساب القيم الدقيقة للتيار المستقبل عندما ترسل نقطة او فاصل عبر كابل بحري . اما التناول الاقوى لهذه المشاكل فقد اعقب اختراع الهاتف عام ١٨٧٥ على يد الكسندر غراهام بيل . لا يستخدم الهاتف الاشارات البرقية البطيئة المستندة لقطع ووصل التيار بل يستخدم جملة تيارات تختلف شداتها بشكل مستمر وناهم عبر ساعات مختلفة وبسرع تعادل عدة مئات السرعة المستخدمة في البرق اليدوي .

ساعد عدد من العقول الجبارة في المعالجة الرياضية لاختراع الاتصال الهاتفي ومن أبرز الأسماء المساهمة : الرياضي الفرنسي العظيم هنري بوانكاريه ، الصقري الانكليزي التواضع اوليفر هيفيسايد والمخترع ميشيل بايين واخيرا جورج كلبل من شركة الهواتف والبرق الأمريكية .

كانت الطرائق الرياضية التي استخدمها هؤلاء العلماء امتدادا لتلك التي استخدمها الرياضي والفيزيائي الفرنسي جوزيف فورييه في القرن التاسع عشر لدراسة التدفق الحراري . لقد طبقت هذه الطريقة لدراسة الاهتزازات وكانت وسيلة ناجحة لتحليل التيارات الكهربائية المتغيرة على نحو معقد كما هي الحال في تيارات الهاتف والبرق .

يستحيل علينا التقدم دون فهم بعض مساهمات فورييه ، تلك المساهمات التي أثبتت ضرورتها في كل الاتصالات وفي نظرية الاتصالات . ان الأفكار الأساسية ولحسن الحظ بسيطة للغاية ، اما عن براهينها والتعقيدات المترتبة على تطبيقها ، فسنضطر الى حذفها هنا .

لقد بنى فورييه معالجاته الرياضية لمسألة التدفق الحراري على تابع رياضي خاص يعرف باسم تابع الجيب . يوضح الجزء الأيمن من الشكل ٢ - ٤ جزءا من هذا التابع .



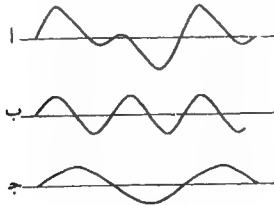
الشكل ٢ - ٤

مقدمة الى نظرية جـ

يتغير ارتفاع الموجة ع نحو الأعلى والأسفل بمرور الوقت ويتكرر هذا التقلب دائماً وأبداً . ليس للموجة الجيبية بداية أو نهاية وهي ليست مجرد منح منهنز مستمر ، إذ أن ارتفاع الموجة (والذي يمكن أن يمثل شدة التيار أو الكمون) يتغير وفق إيقاع خاص مع مرور الزمن . يمكننا أن نمثل هذا التغير بحركة ذراع مرتبط بمقبض يدور بسرعة ثابتة ، كما هو مبين في يسار الشكل ٢ - ٤ . يتغير ارتفاع الذراع فوق المحور ع بشكل جيبي تعاماً مع الزمن .

إن الموجة الجيبية هي مجرد مثال بسيط للتغيرات في مجرى الزمن . ويمكن أن نميزها أو أن نصفها وأن نميزها عن غيرها من الأمواج الجيبية بواسطة ثلاث كميات ، إحدى هذه الكميات هي أكبر ارتفاع فوق الضفر وتسمى السعة ، أما الكمية الأخرى فهي لحظة بلوغ أكبر ارتفاع وتسمى الطور ، وأخيراً الفترة الزمنية الفاصلة بين بلوغيين متتاليين للارتفاع الأكبر وتسمى المود د . نستفيض عادة من استخدام المود باستخدام مقلوبه $\frac{1}{D}$ ويدعى التواتر ونرمز له بالحرف θ . وهكذا إذا كان دور

الموجة الجيبية $\frac{1}{100}$ من الثانية كان تواترها 100 مرة في الثانية واختصاراً 100 هـ ث . وتعرف الهزة على أنها مجمل التغير بدءاً من قمة معينة للموجة مروراً بحضيض لها وحتى قمة تالية . أما كون الموجة الجيبية دورية الطابع فيعني أن التغير المذكور بين فمتين متتاليتين مروراً بحضيض متوسط يكرر نفسه بشكل متطابق تماماً .



الشكل ٢ - ٥

نجح فورييه في البرهان على نظرية حول الامواج الجيبية ادهشت معاصريه كثيراً . فقد اثبت ان تغير اية كمية مع الزمن يمكن ان يمثل بدقة كلمة كمجموع عدد من التغيرات الجيبية تختلف عن بعضها بالسمت والاطول والتوخرات . ويمكن ان تكون الكمية المعنية انزليح وتر مهتز ، او منسوب الامواج المتلاطمة في البحر ، او درجة حرارة شاردة كهربائية واخيراً شدة او كون التيار في سلك هاتف او مبرقة . ان القوانين الحاكمة لكل هذه الظواهر يمكن ان تخضع لتحليل فورييه ويوضح الشكل ٢ - ٥ هذه القضية بشكل مبسط فارفع المنحنى الدوري ٢ فوق المحور يساوي مجموع ارتفاعي المنحنيين الجيبين ب ، ج .

يبدو تمثيل التغيرات المعقدة مع الزمن لكمية فيزيائية معينة مجموع تغيرات جيبية بسيطة مجرد مهارات رياضية وحسب . الا ان الاستفادة من ذلك التمثيل تستند في واقع الامر الى حقيقتين فيزيائيتين . لا تتغير دارات ارسال الاشارات الكهربائية مع الزمن ويتبع سلوكها ما يدمى بالنمط الخطي . نفرض مثلاً اننا ارسلنا اشارة واحدة ندموها باشارة الدخل عبر السلك ورسماً منحنياً يمثل التغيرات الزمنية لسعة الاشارة المستقبلية ، ثم كررنا نفس العمل من اجل اشارة دخل اخرى ، ثم جمعنا اشارتي الدخل اي شكلنا اشارة جديدة يساوي تيارها عند كل لحظة المجموع البسيط لتياري الاشارتين لحصلنا عند ذلك على اشارة مستقبلية جديدة او اشارة خرج تساوي المجموع البسيط لاشلوتي المخرج المقابلتين لاشارتي الدخل المعبرتين .

نستطيع ان ندرك على الفور ان دارات الاتصالات لا تتغير على نحو هام مع الوقت . يمكننا شرح مفهوم الخطية كما يلي : اذا عرفنا اشارات المخرج وبشكل منفصل لعدد من اشارات الدخل المرسلة بشكل مستقل ، ثم ارسلنا اشارات الدخل هذه في وقت واحد ، فلن اشارة المخرج الناتجة في هذه الحالة تساوي المجموع البسيط لاشارات المخرج المنفصلة المشار اليها . وهكذا ففي دائرة كهربائية خطية او نظام بث ، تتصرف لاشارات كما لو كانت موجودة بشكل مستقل عن بعضها ، انها ببساطة

لا تتداخل . نشير هنا الى ان هذا المفهوم الاخير هو في واقع الامر المعيار الذي نحكم بواسطته على دارة ما على انها خطية .

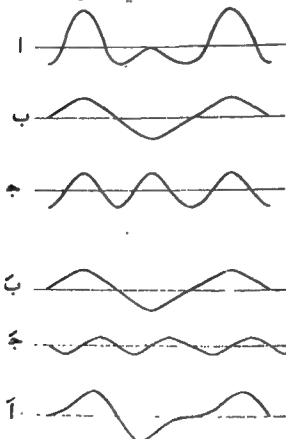
ان كون الخطية تظاهرة مذهشة للطبيعة لا يعني انها نادرة على الاطلاق اذ تشمل صفة الخطية كل الدارات التي قدمنا لها في الفصل الاول والمؤلفة من المقاومات والكثفات والمحركات . كذا شان الاسلاك والكوابل البرقية . ان كل الدارات الكهربائية ، في واقع الامر خطية ، باستثناء تلك التي تتضمن الانابيب المفرغة او الترانزستورات أو الصمامات ، على الرغم من ان هذه الاخيرة تكون في بعض الاحيان خطية فعلا .

يمكن لشارتين برقيتين الانتقال باتجاهين متعاكسين عبر سلك واحد وفي وقت واحد دون أن تتداخلا ويعود ذلك لكون الاسلاك البرقية خطية اي أن الاشارات الكهربائية المعولة عليها تتصرف بشكل مستقل دون ان تتبادل التأثير . ليست الخاصة الخطية ظاهرة طبيعية عامة ، رغمًا من كونها مألوفة في الدارات الكهربائية ، فلا يستطيع قطران مثلاً الحركة باتجاهين متعاكسين على نفس الخط الحديدي دون أن يتداخل . وما على القاريء إلا أن يتصور طالع سوء لصف خطي من الكائنات .

دعونا نعد لبث الاشارات عبر الدارات الكهربائية وقد استوعبنا خاصة الخطية المدهشة . لقد رأينا للتو انه من أجل معظم اشارات المدخل يختلف شكل اشارة الخرج وتغيرها مع الزمن بالمقارنة مع اشارة المدخل وقد أوضح الشكلان ٢ - ١ و ٢ - ٢ هذا الامر . إلا انه يمكن ان نبرهن بطريقة رياضية (لن نفعل ذلك هنا) اننا اذا استخدمنا اشارة جيبية كذلك في الشكل ٤ - ٢ كاشارة دخل الى محور إرسال خطي فاننا نحصل على الاوامر عند المستقبل على موجة جيبية لها نفس الدور او التواتر ، إلا ان سعة موجة الخرج الجيبية يمكن ان تكون اقل من سعة موجة الدخل الجيبية ، ويدهى ذلك بتخفيف الاشارة الجيبية ، كذلك يمكن لموجة الخرج الجيبية أن تبلغ الدورة في وقت تالر بالنسبة لموجة الدخل الجيبية ، وهذا ما نسميه بانحراف الطور أو تأخر الاشارة الجيبية .

يتوقف تخامد الموجة ومقدار تأخرها على تواترها . وفي الواقع قد تعجز الدارة كلية عن نقل موجة جيبية بتواتر معين . وهكذا إذا استخدمنا إشارة دخل مكونة من عدة مركبات جيبية سنحصل على إشارة خرج مكونة من عدة مركبات لها نفس التواترات ولكن لها أطوار نسبية مختلفة أو تأخرات وكذلك سعلت مختلفة . لذا سيختلف ، بصورة عامة ، شكل إشارة الخرج عن شكل إشارة الدخل ، ويمكن النظر الى هذا الاختلاف على أنه متسبب من التغيرات في التأخرات النسبية والسعات للمركبات المختلفة وترتبط هذه الفروق بالتوترات المختلفة . إذا كان التخامد والتأخر لدارة معينة غير متغيرين بتغير التواترات ، كان شكل إشارة الخرج هو نفسه شكل إشارة الدخل ، وكانت الدارة غير مشوهة .

لقد أوضحت هذه القضية الهامة في الشكل ٢ - ٦ .



الشكل ٢ - ٦

لدينا في الشكل ٢ - ٦ - ٢ إشارة دخل يمكن التعبير عنها كمجموع مركبتين جيبتين ب' ، ح' لا يطرأ أي تخفيف أو تأخير على الموجة ب عبر الإرسال وهكذا تكون إشارة المخرج ب والتي لها نفس تواتر ب مطابقة لـ ب' ، إلا أن المخرج ح' قد نابه التخفيف والتأخير بالمقارنة مع الدخل ح' ، وهكذا يكون المخرج آ' ، وهو مجموع المخرجين ب' ، ح' ، شكلاً مختلفاً عن الدخل آ' . يتكون المخرج ، مع ذلك ، من مركبتين لهما نفس التواترين المتواجدين في الدخل ، وكل ما في الأمر أن مركبات التواتر لها أطوار نسبية مختلفة أو تواترات وسعات نسبية مختلفة في المخرج بالمقارنة مع الدخل .

يتيح تحليل فورييه للإشارات الى مركبات لها تواترات مختلفة دراسة خصائص الإرسال لدائرة خطية ومن أجل كل الإشارات بدلالة الإخماد والتأخر اللذين تفرسهما الدائرة على الأمواج الجيبية المختلفة لتواترات التي تجتازها .

بشكل تحليل فورييه أداة فعالة لدراسة مساقيل ارسال . لقد زود ذلك التحليل الرياضيين والمهندسين بنتائج واسعة التنوع لم يستطيعوا في البدء فهمها . لذا اخترع رجال البرق الاوائل كل انواع الاشكال والتراكيب من الاشارات التي تصوروها ان لها مواصفات معينة ، إلا انهم في اغلب الاحيان اخطوا استخدام الرياضيات وكانت مناقشتهم غير صحيحة . لقد دارت مناقشات حلبية حول كفاءة الاشارات المختلفة في الحد من النقاىس التي تفرسها سرعة الدائرة وتداخل الرموز ، وللضجيج ، وحدود الطاقة المرسله .

انضم هاري نيكويست عام ١٩١٧ الى الشركة الاميركية للهاتف والبرق وذلك مباشرة بعد حصوله على شهادة الدكتوراه من جامعة يال (كانت شهادات الدكتوراه نادرة في تلك الايام) . كان نيكويست ماهراً بالرياضيات وتفوق في هذا المجال على اقرانه الذين تناولوا مسائل البرق وكان على الدوام واضحاً واصيلاً ومفلساً لقضايا الاتصالات . لقد

تعمق في دراسة مشاكل البرق مستخدماً أساليب فعالة ونظرة ثاقبة .
ونشر في عام ١٩٢٤ نتائج بحث هام بعنوان : العوامل المؤثرة على
سرعة البرق .

شمل هذا البحث عدداً من مسائل البرق ، وأوضح الى جانب أشياء
أخرى العلاقة بين سرعة البرق وعدد قيم التيار كحللة قيمتين للتيار
+ ١ - ، ١ + أو أربعة قيم + ٣ ، ١ - ، ١ - ، ٣ - . يقول نيكويست
إننا إذا أرسلنا رموزاً (قيماً متتالية للتيار) بدفق ثابت ، فإن سرعة
الارسال و ترتبط بعدد قيم التيار م بالعلاقة :

$$و = ك لع م$$

حيث ك هو ثابت يعتمد على عدد قيم التيار المتتالية المرسل في كل
ثانية . يعني الرمز لع م لوغاريتم م . من المعلوم ان هناك أسساً مختلفة
للوغاريتمات ، وهكذا إذا اخترنا الأساس ٢ فيمكن ان نحسب لع م من
اجل بعض قيم م وفق الجدول التالي :

لع م	م
٠	١
١	٢
١.٥٨	٣
٢	٤
٢	٨
٤	١٦

يمكننا اجمال موضوع اللوغاريتم من خلال المعادلة التالية المبينة
لعنى لع س :

$$لع س = ٢$$

وبأخذ لوغاريتيمات الطرفين لهذه المعادلة تبين لنا صحة العلاقة التالية .

$$\begin{aligned} \text{لع س} &= \text{لع ٢} \\ \text{وإذا عوضنا عن لع س بالرمز ع لحصلنا على :} \\ \text{لع ٢} &= \text{ع} \end{aligned}$$

وهذا يتفق تماماً مع ما ورد في الجدول أعلاه .
سنبين من خلال مثال موائمة اللوغاريتم . لعلاقة نيكويست .
نفرض أننا نرغب بتجديد خيارين مستقلين لحالة الرسالة : مرسله أو متوقفة ، ١ أو . في نفس الوقت . هناك أربعة تراكيب مختلفة للخيارين المستقلين ١ أو . كما هو موضح في الجدول التالي :

رقم التركيب	الخيار الأول . أو ١	الخيار الثاني . أو ١
١	٠	٠
٢	٠	١
٣	١	٠
٤	١	١

وإذا أردنا أكثر من ذلك تحديد ثلاثة خيارات مستقلة من الصفر أو الواحد في نفس الوقت نحصل على التراكيب الثمانيّة المختلفة التالية :

رقم التركيب	الخيار الأول . أو ١	الخيار الثاني . أو ١	الخيار الثالث . أو ١
١	٠	٠	٠
٢	٠	٠	١
٣	٠	١	٠
٤	٠	١	١
٥	١	٠	٠
٦	١	٠	١
٧	١	١	٠
٨	١	١	١

وإذا أردنا وبشكل مماثل تحديدا أربعة خيارات مستقلة من الصفر أو الواحد في نفس الوقت لحصلنا على ١٦ تركيب مختلف ، وبصورة عامة إذا أردنا تحديد ع خيار مستقل من الصفر أو الواحد لحصلنا على ع تركيب مختلف .

إذا استطعنا تحديد ع خيار مستقل من الصفر أو الواحد في وقت واحد لاستطعنا بالنتيجة إرسال ع رسالة مختلفة في نفس اللحظة وتكون سرعة الإرسال متناسبة مع ع ، ولكن بإرسالنا رسالة في نفس الوقت فواجه ع تركيب ممكن من ع خيار مستقل من الصفر أو الواحد . وهكذا لإرسال ع رسالة في نفس اللحظة نحتاج لإرسال ع رمز مختلف أو قيمة تيار . نفرض أننا نستطيع الاختيار من ع رمز مختلف . يملنا نيكويست وجوب حساب لوغاريتم عدد الرموز للحصول على سرعة الإرسال ، أي :

$$C = \log_e E$$

وهكذا فعدد الخيارات المستقلة من الصفر أو الواحد التي يمكن تمثيلها في وقت واحد وهو عدد الرسائل المختلفة التي يمكن إرسالها في نفس اللحظة ، يساوي لوغاريتم عدد الرموز .

تنص علاقة نيكويست على أن الانتقال من البرق الثنائي الذي يستخدم الفصل والوصل إلى برق التيارات الثلاثة (٠ ، ١ ، -١) ، يمكن من زيادة سعة إرسال الأحرف أو الرموز الأخرى بنسبة ٦٠٪ وإذا استخدمنا أربعة قيم للتيار (٠ ، ١ ، -١ ، ٢) فتتضاعف السرعة . كان هذا ما فعله بالطبع أديسون في مبرقته الربلية إذ أرسل رسالتين عوضا عن واحدة . أوضح نيكويست بعد ذلك أن استخدام ثمانية قيم للتيار (٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ أو ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧) ،

١-٤ ، ٢-٤ ، ٥-٧) سيفلصف سرعة الارسال اربع مرات بالمقارنة مع قيمتين للتيار . الا انه بين ان الاضطرابات في تخفيف الدارة ، التداخل أو الضجيج ، وحدود الطاقة الممكن استخدامها ، كل ذلك سيزيد في صعوبة استخدام عدة قيم للتيار .

عرف نيكويست ، بالعودة الى السرعة التي يمكن ارسال الاشارات ونقها ، سرعة الخط على انها نصف عدد مركبات الاشارة (نقاط) فواصل ، قيم تيار) التي يمكن ارسالها في الثانية . سنجد ان هذا التعريف اكثر علائمة على وجه التخصيص لاسباب لم يوضحها نيكويست في بحثه الاول .

كان من المعتاد ارسال الاشارات الهاتفية والبرقية عبر نفس الاسلاك خلال الفترة التي قام عندها نيكويست بابحاثه يستخدم الهاتف تواترات اعلى من ١٥٠ هـ. ق. ث ، بينما يمكن تنفيذ الارسال البرقي بواسطة اشارات ذات تواترات اخفض . لوضع نيكويست كيفية تشكيل الاشارات البرقية بحيث لا يكون لها مركبات جيبية بتواترات عالية للدرجة يمكن معها سماحها كموجة متداخلة عبر الهواتف المربوطة الى نفس الخط . وذهب نيكويست ابعد من ذلك بملاحظته ان سرعة الخط وبالتالي سرعة الارسال تتناسب مع عرض أو امتداد مجال أو حزام التواترات المستعملة في البرق ، ونلمح الآن في مجال التواترات هذا بعرض حزام الدارة أو الإشارة .

يرهن نيكويست اخيراً بتحليل صنفه معين من الاشارات البرقية ، ان هذه الاشارة كانت تحتوي في كل الاوقات على مركبة جيبية مستقرة ذات سعة ثابتة . لم تكن هذه المركبة بذات فائدة لدى المستقبل ، على الرغم من كونها جزءاً من الطاقة المرسله المستخدمة ، اذ كان ممكناً التنبؤ باضطراباتها الدائمة المتواترة وبالتالي تجهيزها عند المستقبل بدلا من ارسالها عبر الدارة . اشار نيكويست الى مركبة الاشارة هذه المدمية الفائدة وذكر انها لا تنقل أي معلومة مفسرة واسماها لذلك فائضة ، وهو مصطلح سنواجهه فيما بعد .

تايك نيكويست دراسة مشاكل البرق ونشر عام ١٩٢٨ بحثا هاما آخر بعنوان : (جوانب هامة من نظرية الارسال البرقي) اثبت فيه عددا من النقط الهامة . بين نيكويست انه اذا ارسلنا عددا من قيم التيار المختلفة مساويا ٢ ن في الثانية ، فان المركبات الجيبية للاشارة التي تتجاوز تواترها القيمة ن هي مركبات فائضة ، بمعنى انه لا ضرورة لها اطلاقا في استنتاج ترتيب قيم التيارات المرسلة من خلال الاشارة المستقبلية . شرح نيكويست بعد ذلك كيفية تكوين اشارة لا تحتوي تواترات حول القيمة ن ه ف ث والتي يمكن للمستقبل بواسطتها استنتاج قيم التيار المرسلة كان هذا البحث الثاني لنيكويست اكثر غنى بالتفاصيل والكميات وادق في نفس الوقت بالمقارنة مع بحثه الاول . يشكل هذان البحثان المادة الاكثر اهمية المتضمنة في نظرية الاتصالات .

كان ذهن ر.ف.ل. هارثلي منشغلا في نفس الوقت بالابعاد الفلسفية لارسال المعلومات ، وهارثلي هو مخترع الهزاز المعروف باسمه هزاز هارثلي . وقد قصص تأملاته في بحث نشره عام ١٩٢٨ بعنوان (ارسال المعلومات) .

لقد كان لهارثلي طريقة مشوقة في صيغة مسألة الاتصالات ، وهي واحدة من طرائق وضع القضايا بالشكل المبكر والواضح خاصة ثوب البهامة الذي تبني به عند عرضها ولكنها وعلى الرغم من ذلك تحتاج لسنوات حتى تتنامى النظرة الثاقبة التي تؤهل احدا ما لبسطها رأى هارثلي المرسل وقد جهز بمجموعة من الرموز (احرف الابجدية مثلا) يمكنه انتقاء ما شاء منها بشكل عقلي وارسالها رمزا بعد رمز مولدا بذلك سلسلة من الرموز ، ولاحظ ان حدثا تصادفيا كدرجة عدد من الكرات في مجموعة من الجيوب يمكنه بشكل مماثل لتوليد هذه السلسلة . عرف بعد ذلك المعلوماتية في الرسالة ورمز لها بالحرف ه ، ووفق تعريفه تساوي ه لوغاريتم عدد كل الاشكال المختلفة للسلسلة التي كان يمكن اختيارها ، وبرهن ان : ه = ل ل ع س ، حيث ل هو عدد الرموز المكونة للسلسلة ، و س عدد الرموز في المجموعة التي يتم انتقاء الرموز المكونة للسلسلة منها .

بعد ما قدمناه مقبولا في ضوء معارفنا المعاصرة عن نظرية المعلومات اذا تم انتقاء الرموز المتتالية بشكل مستقل وكانت رموز المجموعة متكافئة في احتمال انتقائها . وكل ما يلزمنا في هذه الحالة ان نلاحظ كما في السابق ان لو غاربتم عدد الرموز س أي لع س يساوي عدد الخيارات المستقلة للصفر او الواحد التي يمكن تمثيلها او إرسالها في وقت واحد ولعله امر منطقي ان تساوي سرعة إرسال المعلومات جداء سرعة إرسال الإشارات في الثقة : ل وعدد الخيارات المستقلة للصفر او الواحد المحمولة في كل إشارة .

ذهب هارثلي أبعد من ذلك بتناوله موضوع ترميز الرموز الأولية (أحرف الأبجدية مثلا) بدلالة الرموز الثنائية (مثلا سلاسل النقاط والفراغات والخطوط وفق ترميز مورس) ، وبرهن أن البث الأسرع للرسائل يتطلب ان تكون اطوال الرموز الثانوية (تمثيل مورس الرمزي) محكومة بقيود اختيار الرموز (مثلا حقيقة ان الحرف E في اللغة الانكليزية أكثر تواترا وبالتالي أكثر اختيارا من الحرف Z) . كنا قد اوضحنا ان مورس نفسه قد تفهم هذا الامر الا ان هارثلي وضمه في صيغة سهلة المنال سيما الطرائق الرياضية وفتح ذلك الباب على مصراعيه امام ابعدك أخرى تالية . اقترح هارثلي خطة لتطبيق هذه الاعتبارات على الاشارات المستمرة كاشفرات الهاتف او اشفرات الصور .

البث هارثلي أخيراً وبما يتلادم مع نيكويست ان كمية المعلومات الممكن إرسالها تتناسب مع جداء عرض الحزام في وقت الإرسال . الا ان ذلك يضعنا في حيرة من حدد قيم التيارات المسموحة والتي لها اهميتها اعلى سرعة الارسل . كيف يمكن أن نرقعها .

مرت نظرية الاتصالات بفترة طويلة من الاسترخاء والراحة بعد نيكويست وهارثلي . اذ انشغل العاملون فيها بدراسة وبناء انظمة اتصالات متخصصة . وتطور هذا الفن الى اشكال معقدة فعلا خلال

الحرب العالمية الثانية . لقد تم استيعاب أنظمة وأجهزة اتصالات جديدة على حساب قصور كبير في صيغة المبادئ الفلسفية .

كان أمراً هائلاً أثناء الحرب معرفة مسارات الطائرات من خلال معلومات رادارية غير دقيقة يشوبها الضجيج ، وذلك لتسهيل إسقاط تلك الطائرات . ودفع هذا بدوره إلى السطح قضية أخرى : ماذا لو مثل تيار كهربائي متغير المعلومات الخاصة بموقع طائرة ولكن قد أضيف إليه تيار شائب آخر لا معنى له أي ضجيج . يمكن أن تكون التواترات الأكثر وروداً في الإشارة مختلفة من التواترات الأكثر وروداً في الضجيج ، عندها يكون من المرجح فيه تمرير الإشارة والضجيج المضاف إليها في دائرة كهربائية أو مرشح تضعف بنتيجته التواترات الواردة في الضجيج بينما لا تتأثر تلك الواردة في الإشارة . يمرر بعد ذلك التيار الكهربائي الناتج في دوائر أخرى في محاولة لمعرفة ماذا يمكن أن تكون عليه الإشارة الأصلية من دون ضجيج بعد ثوان قليلة من اللحظة الراهنة . ماذا يمكن أن يكون ذلك النوع من تركيب الدوائر الكهربائية الذي سيسمح بأحسن تنبؤ عن قيمة الإشارة الحقيقية بعد ثوان في المستقبل اعتباراً من الإشارة الحالية المشوبة بالضجيج .

نتناول في هذه المسألة أساساً مجموعة كاملة من الإشارات الممكنة (مسارات للطائرة) وليس إشارة واحدة وهكذا فليس في مقدورنا أن نحدد مقدماً أي الإشارات نهمنا ، والأسوأ من ذلك أننا نتعامل مع ضجيج لا يمكن التنبؤ به .

لقد حل هذه المشكلة في الاتحاد السوفييتي العالم كولوموغروف ، بينما حلها في أمريكا وبشكل منفصل العالم نوربرت وينر . كان وينر رياضياً أهله خلفيته لمعالجة هذا النوع من المسائل واكمل أثناء الحرب وثيقة دعت بالخطر الأصفر لما سببته من صداع لدراستها حل فيها المسألة الصعبة بشكل كامل .

شهدت فترة الحرب وما بعدها انشغال رياضي آخر هو كلود .
اي شانون بالحالة العامة لمسألة الاتصالات بدأ شانون بعتبر
حسناً أنظمة الاتصالات الحديثة وسمى لايجاد معيار اساسي لقارنة
ميزاتها . نشر شانون عام ١٩٤٨ . بحثاً في جزئين يعتبر القلعة
الاساسية لنظرية الاتصالات المعاصرة ، ونشر واينر في نفس العلم
كتابه (السيبرنتيك) والذي يعرض للاتصالات والتحكم .

يتناول شانون واينر على حد سواء مشكلة الاحاطة بأي اشارة
منتقاة من زمرة او مجموعة من الرموز الممكنة وليس مشكلة اشارة
واحدة بعد ذاتها . لقد حدث تبادل حر للافكار بين مختلف العاملين في
المعلوماتية قبل نشر بحث شانون وكتاب واينر ، حيث تظهر افكار
وعبارات متشابهة في المرجعين ، الا ان تفسير شانون يبقى مع ذلك
وحيداً من نوعه .

اربط اسم واينر مع مهمة استخلاص اشارات مجموعة معينة من
ضجيج معروف النوعية . سبق ان قدمنا آتفا مثلاً عن ذلك . يتبع
الطيار المعادي مساراً يختاره بنفسه ، وتضيف اجهزة رادارنا ضجيجاً
طبيعياً المنشأ الى الاشارات المثلثة لموقع الطائرة . وهكذا يصبح لدينا
مجموعة من الاشارات الممكنة (المسارات المحتملة للطائرة) الخارجة عن
قائمة اختيارنا مزججة مع ضجيج هو بدوره ليس من اختيارنا وعلينا
ان نصل الى التقدير الامثل لقيمة الاشارة الحالية او المستقبلية (الموقع
الحالي او التالي للطائرة) وبصرف النظر عن الضجيج المتواجد .

اما اسم شانون فقد اقترن بمواضيع اخرى كترميز رسائل منتقلة
من مجموعة معينة بحيث يمكن نقلها بوجود الضجيج بسرعة وبدقة وعلى
سبيل المثال تفترض ان لدينا مصدراً للارسال هو نص باللغة الانكليزية
لم يتم باختياره ، اضافة لدائرة كهربائية ككابل برق مشوب بالضجيج ،
هو بدوره ليس من اختيارنا ايضاً . الا ان المسألة التي عالجها شانون
تسمح لنا اختيار طريقة ترميز الرسالة باشارة كهربائية وكم هي القيم

المختلفة للتيار الكهربائي التي سنسمح بها مثلا وما هو عدد ما سنرسله منها في كل ثانية . ليست المسألة إذن هي معرفة طريقة معالجة الإشارة والضجيج المضاف إليها بهدف الوصول إلى أفضل تقدير للإشارة ، بل هي تحديد نوعية الإشارة المرصع إرسالها لتحقيق إيصال أمثل للرسائل التي هي من نمط معين عبر نوع محدد من الدارات التي يشوبها الضجيج .

تشكل قضية الترميز الفعّال هذه مع نتائجها المادة الرئيسية لنظرية المعلومات حيث تعتبر مجموعة من الرسائل ، ويعكس البحث روح أعمال كل من كولوموغوروف ، وإيتر موديس ، وهارلي .

لعله من غير المجدي أن نحاول هنا مراجعة أعمال شانون ، سيما وأن هذا الكتاب برمته يدور حول هذه الأعمال وسنرى فيما بعد أن هذه الأعمال تلقي أضواء كلشفة على المشاكل التي أثارها نيكويست وهارلي وتذهب بعيدا وراء تلك المشاكل .

يجب أن نذكر اسمين آخرين عند استعراضنا لنظرية المعلومات نشر دينيس غلور عام ١٩٤٦ بحثا بعنوان نظرية الاتصالات ، ومهما كان من إيهام هذا العنوان فقد فات البحث تضمين الضجيج الذي يتسع في القلب من نظرية الاتصالات المعاصرة . شهد عام ١٩٤٩ بحثا آخر لتأثر بعنوان الحدود النظرية لسرعة إرسال المعلومات ، وكان هذا البحث موازيا لعمل شانون وبشكل جزئي .

لقد انطوى جوهر هذا الفصل على حقيقة مفادها أن نظرية الاتصالات العامة التي قدمها لنا شانون قد نمت وترعرعت من دراسة المسائل المتخصصة للاتصالات الكهربائية . واجه مورس مشكلة تمثيل الأحرف الأبجدية بنبضات كهربائية طويلة أو قصيرة تتخللها فواصل لا نبض فيها - أي بخطوط ونقاط وفراغات البرق الموهودة . لقد اختار وبشكل صائب تمثيل الأحرف المتواترة بتراكيب قصيرة من الخطوط والنقاط والأحرف النادرة بتراكيب أطول ، وكان هذا الخيار الخطوط الأولى في الترميز الفعّال للرسائل ، وهو ركن أساسي من نظرية الاتصالات .

استخدام تلاميذ مورس شدات واتجاهات مختلفة لدفق التيار الكهربائي بهدف إعطائه المرسل فرص أكثر لانتقاء الإشارات بالمقارنة مع الخيارين التقليديين : إرسال أو توقف . زاد ذلك من عدد الاحرف المرسلة في واحدة الزمن ولكنه رفع من حساسية الإشارة لأي اضطراب كهربائي غير مرغوب فيه مما يسمى بالضجيج كذلك قلل من امكانات الدارات للاستجابة السريعة في حالات التغيرات السريعة للتيار .

برزت الحاجة لتقييم الميزات النسبية لعدد متنوع من الإشارات البرقية ، وكان لا بد من أداة رياضية لتحقيق ذلك . وليس غريباً أن يكون تحليل فورييه هو الاداة ، إذ بواسطة ذلك التحليل يمكن تمثيل اية إشارة كمجموع امواج جيبية ذات تواترات مختلفة .

إن معظم دارات الاتصالات من النوع الخفي ويعني ذلك أن تواجد عدد من الإشارات في نفس الدارة لا يؤدي لأي تدخل أو تبادل للتأثير بينها . ويمكننا أن نبرهنه إن اثر الدارة الخطية على الموجة الجيبية ينحصر باضعافها أو تخفيفها وتأخير زمن وصولها هذا على الرغم من حقيقة أنه حتى الدارات الخطية قد تفيد في اشكال معظم الأمواج . وهكذا فعندما تمثل موجة معقدة كمجموع امواج جيبية بتواترات مختلفة، يمكن اجراء حساب بسيط لاثار الدارة الخطية على كل مركبة جيبية بشكل منفصل وبجمع المركبات الجيبية المخففة أو المضعفة نصل إلى قيمة الموجة المستقبلية . المقابلة للموجة الاصلية المعقدة .

اثبت نيكويست أن عدد قيم التيار المختلفة التي يمكن إرسالها عبر دارة معينة في ثانية يساوي ضعف المجال الكلي أو حرمة التواترات المستخدمة . وهكذا يتناسب عدد الاحرف المرسلة مع عرض الحزمة اثبت كل من هارثلي ونيكويست أيضا أن سرعة نقل الاحرف تتناسب مع لوغاريتم عدد قيم التيار المستخدمة .

احتاجت النظرية المتكاملة للاتصالات أدوات رياضية أخرى وافكر

محددة . وارتبط ذلك الجانب من النظرية بأعمال كولوموغروف وواينر
الذين درسا مشكلة إشارة مجهولة من نوع معين تشوشها إضافات
من الضجيج . كيف يمكن ترشيح الإشارة على الرغم من وجود الضجيج ،
هكذا ما أجب عنه بالتفصيل كل من كولوموغروف وواينر .

تختلف المسألة التي ندر شاقون نفسه لها عما تقدم . نفرض أن
لدينا مصدر إرسال ينتج رسائل من نوع معين كالنصوص الإنكليزية
مثلا . ونضيف الى ذلك فرضاً آخر مفاده أن بحوزتنا قناة اتصال ذات
مواصفات محددة ولكنها مشوبة بالضجيج . فكيف يمكننا أن نمثل أو
نرمز الرسائل من المصدر المرسل باستخدام الإشارات الكهربائية
للحصول على أسرع إرسال ممكن عبر القناة المعتبرة ، وبشكل عملي
ما هي السرعة التي نتمكن بواسطتها من إرسال رسالة معينة عبر قناة
معطاة بدون أخطاء . هذا هو عرض تقريبي وعام للمسألة التي طرحها
شاقون على نفسه ثم قام بحلها .



الفصل الثالث

مفهوم رياضي

إن النظرية الرياضية التي تحاول تفسير العالم والتنبؤ بأحداثه تعتبر على الدوام نموذجاً مبسطاً لهذا العالم . لا تدخل في صلب تشكيله إلا الأشياء التي لها صلة بالظاهرة المدروسة .

وهكذا تتركب الكواكب من مواد مختلفة صلبة ، سائلة ، وغازية في ضغوط ودرجات حرارة متباينة . تمكس الأقسام من تلك المواد المعرضة لنور الشمس نسباً من الألوان المختلفة للضوء الساقط عليها وهذا يؤدي للملاحظة بقما لونية مختلفة عندما تقوم برصد تلك الكواكب . إلا أن الفلكي الرياضي لا يحتاج كل ذلك عند حسابه لمدارات الكواكب حول الشمس وكل ما يأخذه بالاعتبار في هذه الحالة كتلتي الشمس والكوكب المعتر وبعد الكوكب عن الشمس ، وأخيراً سرعة الكوكب وجهة حركته عند لحظة ابتدائية معينة . وإذا رغب الفلكي بحساب أكثر دقة يدخل في حسابه كتل وحركات الكواكب التي تفرض أثراً ثقالياً على الكوكب المدروس .

لا يعني ذلك أن الفلكيين غير معنيين بالأحوال الأخرى للكواكب وكذلك بالنجوم والسدم ، إلا أن النقطة الجوهرية في الموضوع أنهم لا يحتاجون هذه الأمور لدى حسابهم مدارات الكواكب . تبرز جماليات وقوة النظرية الرياضية والنموذج الرياضي في الفصل بين ما هو هام وما هو أقل أهمية ، وهكذا يمكن الربط بين بعض الظواهر الملاحظة دون الحاجة لفهم الطبيعة بأكملها والكون بمجمل سلوكه .

تختلف النماذج الرياضية بدرجات دقتها أو امكانات تطبيقها . وهكذا يمكننا حسب مدارات الكواكب بدقة عالية باعتبارها أجساماً صلبة ، على الرغم من انه لا توجد أجسام صلبة في الواقع . ومن جهة أخرى لا يمكن فهم الحركة المديدة لقمر الأرض إلا إذا أخذنا بالحسبان حركة كتل المياه على سطح الأرض أي حوادث المد والجزر . لذا ففي دراسة حركة القمر لا يمكن اعتبار الأرض جسماً صلباً .

ندرس وبشكل مماثل في نظرية الشبكات الخصائص الكهربائية لتوصيلات المحرّضات المثالية والكثفات والمقاومات والتي تتصف بخصائص رياضية بسيطة معينة . أما المركبات الحقيقية المستخدمة بشكل فعلي في الدارات المختلفة كالأراديو والتلفزيون والهاتف وغيرها فهي تقرب الى هذا الحد أو ذاك من المواصفات الرياضية للعناصر المثالية المعتمدة في نظرية الشبكات وهي المحرّضات ، الكثفات والمقاومات ويختلف مقدار الفرق حسب الحالة ، إذ يكون ضئيلاً ويمكن إهماله في دائرة ما ، بينما يجب أخذه بالاعتبار في دائرة أخرى بمزيد من الحسابات المعقّدة .

يمكن أن يكون النموذج الرياضي بالطبع تقريبياً ، وحتى تمثيلاً غير صحيح للحوادث في العالم الواقعي . لذا وقع رجال الاقتصاد الأوائل الأنانيون المدفوعون بحب الربح في مطب مجانبية النماذج الرياضية لأن سلوك الاقتصاديين لم يكن مناسباً وكذلك كان فاشلاً في تفسير العلاقات الاقتصادية في العالم والناس الموجودين فيه .

لقد ضربنا مدارات الكواكب وسلوك الشبكات امثلة عن نظم مثالية حتمية يمكن التنبؤ بسلوكها المستقبلي تماماً كما نتوقع من الآلات ، إذ يمكن للفلكيين حساب مواقع الكواكب لآلاف مقبلة من السنين ، كذلك تطلّعون نظرية الشبكات على كل السلوك اللاحق لشبكة كهربائية عند انقائها بإشارة كهربائية معينة .

تنسحب خاصة الحتمية حتى على الاقتصاديين ، اذ ان الاقتصادي سيحركه على الدوام دافع الربح . إلا انه اذا قام مرة برمي احجار النرد فلنا منه انه المفضل عندها ، فسيصبح مستقبه الاقتصادي على كف عفريت ولا يمكن التنبؤ به فحتى احجار النرد قد تفقد تفضيلها وتتركه عندئذ في حالة خسارة كاملة .

يمكننا على الرغم من ذلك تصميم نماذج رياضية للحوادث العشوائية كسحب عدد ما ، ثلاثة مثلاً ، من الكرات البيضاء او السوداء من علبة تحتوي على العدد نفسه من كلا النوعين . بطلعنا مثل هذا النموذج ، في واقع الامر ، على انه بعد عدد كافٍ من المحاولات تكون قد سحبنا كرات بيضاء وبشكل متتالٍ لمدة تساوي $\frac{1}{2}$ الوقت ، ومزيج من كرتين بيضاوين واخرى سوداء لمدة $\frac{1}{2}$ الوقت ، ومزيج آخر من كرتين سوداوين واخرى بيضاء لمدة $\frac{1}{2}$ الوقت ، واخيراً كرات سوداء وبشكل مستمر خلال $\frac{1}{2}$ الوقت . يفيدنا هذا النموذج ايضاً في معرفة درجات الانحرافات من هذه الأرقام بعد عدد ما من عمليات السحب .

تؤكد الخبرة العملية ان السلوك الإنساني ليس حتمياً بالدرجة التي يسمى اليها الاقتصادي وهو في نفس الوقت ليس عشوائياً كرمي احجار النرد او سحب الكرات من مزيج من الكرات السوداء والبيضاء . إلا انه يجب علينا ان نوضح ان نموذجاً حتمياً لن يذهب بنا بعيداً في تفسير مختلف ظواهر السلوك الإنساني كالاتصالات الإنسانية مثلاً ، بينما يمكن للنموذج العشوائي او الإحصائي فعل ذلك .

نعلم جميعاً ان جداول معدلات الوفيات المستخدمة من قبل شركات التأمين تعطي تنبؤات معقولة فيما يتعلق بنسبة الوفيات المقبلة في مجموعة تضم عدداً كبيراً من المسنين ، هذا على الرغم من صعوبة التنبؤ بموت شخص معين وهكذا يمكننا النموذج الإحصائي من فهم السلوك الإنساني بل وحتى من اجراء بعض التنبؤات الخاصة بذلك السلوك تماماً كما نتنبأ على المدى البعيد وبشكل وسطي بعدد المرات التي سنسحب بها ثلاثة كرات سوداء بمحض المصادفة من مزيج متساوٍ من الكرات البيضاء والسوداء .

قد يفترض البعض بحجة أن جداول معدلات الوفيات تغطي التنبؤات الخاصة بمجموعات من الناس ولا تغطي التنبؤات الخاصة بالأفراد ، إلا أن الخبرة تعلمنا أن باستطاعتنا إجراء التنبؤات الخاصة بالأفراد على قدم المساواة مع التنبؤات الخاصة بالمجموعات . وهكذا إذا عددنا تواتر استخدام الحرف E في النصوص الإنكليزية نجد أن نسبة مرات وروده تساوي ١٣ ٪ بالمقارنة مع الأحرف الأخرى ، يقابل هذا الرقم في حالة الحرف W ٢ ٪ فقط . ولكننا نجد أيضاً نفس نسب الورد للحرفين W, E في نص كتبه أي شخص من الأشخاص . يمكننا أن نتنبأ استناداً إلى ذلك شيء من الثقة أنه إذا كتب أي منا رسالة طويلة جداً أو كتبنا باللغة الإنكليزية فسيبتواتر الحرف E بنسبة ١٣ ٪ فيما كتبه .

لا يعد إمكان التنبؤ بسلوك ما حريتنا أكثر مما تحدها أية صادة أخرى . لا يتوجب على أي منا ائنه الكتابة لإيراد نفس النسب لكل الأحرف كما يوردها شخص آخر . لقد خرج كثيرون من الأشخاص المتميزين من النموذج الشائع . قام ويليام . فـ . فرايدمان المشهور بدراسة الأمور المستعصية ومؤلف كتاب (حل رموز شكسبير) بتزويدي بالأمثلة التالية :

كتب الشاعر الألماني فوغلوب بورمان (١٧٣٧ - ١٨٠٥) ١٣٠ بيت شعر تضمنت ٢٠٠٠٠ كلمة خلت جميعها من الحرف R وذهب هذا الشاعر إلى أكثر من ذلك بحذفه الحرف R من كل الجمل التي استعملها للحوار في حياته العادية خلال الـ ١٧ سنة الأخيرة من حياته .

نشر القاص البرتغالي الوتسو ألكالاهيرا خمس قصص في لشبونة عام ١٦٤١ لم يستخدم فيها أحد الأحرف الصوتية . وقد أورد أمثلة مشابهة كل من الأشخاص التالية أسماؤهم : فرانيسكونا فريت ريسيرا (١٦٥٩) ، فرنالدو جاسينتودي زوريناهارو (١٦٥٤) ، واماتويل لورانزو ليزارازو بربوزانا (١٦٥٤) .

نشر أرنست فنسنت رايت رواية من ٢٦٧ صفحة لم يستخدم فيها الحرف E مطلقاً . ولئن كانت هذه الممارسات الإرادية تدل على عدم استحالة كسر سلاسل المآلوف ، إلا أننا عندما نكتب فإنما نفضل الطريقة الأباعية المتداولة ، وهكذا فعندما لا نرغب بالخروج عن طريقنا بهدف إثبات أن بالإمكان أن نفعل خلاف ما تقدم فإننا نورد الحرف E في كتابتنا الإنكليزية بنسبة ١٣ ٪ تماماً بكل ما في آلة معينة من كفاءة أو كتطبيق قانون رياضي .

لا نستطيع الانتقال من هذه الفكرة الى المفكرة العاكسة المتضمنة أن بإمكان الآلة التي تزرع فيها نفس المعدات كتابة نصوص إنكليزية إلا أن شأنون أوضح كيفية تقريب الكلمات والنصوص الإنكليزية بعمليات رياضية يمكن تنفيذها من قبل آلة معينة .

نفرض على سبيل المثال أن كل ما نستطيع فعله هو انتاج سلاسل من الاحرف والفراغات باحتمالات متساوية . ويمكن تنفيذ ذلك على الصعيد العملي بكتابة كل حرف على نفس العدد من البطاقات المتماثلة وكذلك تخصيص عدد مماثل من البطاقات دون كتلة لتمثيل الفراغ ، وأخيراً وضع الجميع في جعبة ثم سحب احداها واستخدام رمزها سواء اكان حرفاً أم فراغاً . ثم اعادته فخلط البطاقات من أخرى وسحب واحدة لاستخدام رمزها وهكذا . ينتج عن هذا التطبيق ما يلي :

١ - التقريب الصغري (الرموز مستقلة ومتساوية الاحتمال)

XPOML RXKHRJFFJUU ZLPWCFWKCYJ
RFJEYVKOSSGHYD QPAAMKBZAACIBZLHUQD

يتواتر هنا حرفا الـ 2 و W بكثرة ، بينما عدد الفراغات قليل وكذلك عدد مرات ورود الحرف E . يمكننا أن نقترح أكثر من اللفظ الإنكليزية باختيار الاحرف بشكل مستقل من بعضها البعض ولكن باختيار الحرف E مرات أكثر من اختيار الحرفين Z و W . وينفذ ذلك بزيادة عدد البطاقات الخاصة بالحرف E وقلل البطاقات الخاصة

بالحرفين W الحرف ومن ثم تكرار نفس الطريقة السابقة في استخراج البطاقات واستخدام رموزها . ولما كان احتمال ان يكون أحد الحرف E هو ١٣. نضع في الجعبة ١٣ بطاقة خاصة بهذا الحرف وبالمثل نضع بطاقتين فقط للحرف W لان الاحتمال المقابل للحرف الاخير هو ٢. وهكذا بالنسبة لبقية الاحرف . ندرج فيما يلي نتائج هذه التجربة والتي دعاها شانون بالتقريب الاول لنصوص اللغة الانكليزية .

٢ - التقريب الاول (الرموز مستقلة ولكن تساوي تواتراتها مايرد في النصوص الانكليزية) .

OOO HLI RGWR NMEUWIS EU LL NENESEBAYI TH
DEI ALHENHITIPA OOBITVA NAIH BRL

لا نجد في النصوص الانكليزية أي زوج من الاحرف يبدأ بالحرف Q الا الزوج QU ، وهكذا فاحتمال ان تصادف زوجاً مثل QX هو صفر وكذا احتمال مصادفة الزوج QZ وعلى الرغم من كون احتمال ورود الزوج QU اكبر من الصفر فهو احتمال صغير للغاية ، في حين ان احتمال الزوج OR هو ٢.٧ ٪ والزوج TH ١ ٪ والزوج WE ٠.٦ ٪ . تحمل هذه الاحتمالات المعنى التالي . اذا احتوى نص مكتوب على عدد من الاحرف مساوي مثلاً ١٠٠٠١ حرفاً فإن في هذا النص ١٠٠٠٠ زوج متتال من الاحرف وهي : الحروف الاول والثاني ، الثاني والثالث ، الثالث والرابع ، وهكذا حتى الزوج المكون من الحرف ما قبل الاخير والحرف الاخير . نعتبر الزوج T: H ونعد مرات وروده ، حيث يمكن ان يكون العدد الناتج (٣٧٠) .. فاذا قسمنا عدد مرات ورود الزوج TH والذي فرضناه مساوياً ٣٧٠ على عدد كل الأزواج الموجودة والمساوي في مثالنا ١٠٠٠٠ لحصلنا على عدد هو ٣.٧ ٪ وهو احتمال ان نحصل على الزوج TH اذا رفعنا من ذلك النص وبشكل عشوائي زوجاً ما من الاحرف .

أعد بعض المحللين البارمين للشفيرات جداولاً تتضمن احتمالات

معادلة لورود أزواج مختلفة من الاحرف في نصوص اللغة الانكليزية .
نفرض أن لدينا ٢٧ جعبة ، نخصص ٢٦ منها للأزواج التي تبدأ بكل
حرف من حروف اللغة الانكليزية ، بينما الجعبة الاخيرة نخصصها للأزواج
التي تبدأ بفراغات . نضع بعد ذلك عدداً كبيراً من الأزواج في الجعب
بشكل يناسب احتمالات تلك الأزواج ، فمثلاً من اصل ١٠٠٠ (زوج ،
نضع ٣٧ زوج من نوع TH ، ١٠ من نوع WE وهكذا .

• دمونا نتوقف للحظة في محاولة فهم معنى هذه الجعب المليئة بالأزواج
بدلالة عمليات التعداد الاصلية التي أدت لتقويم احتمالات تلك الأزواج .

يمكننا متابعة كل ورود للحرف T في النص اذا نحن جردناه حرفاً
بحرف ، وهكذا سيكون عدد الأزواج البائدة بالحرف T ، والتي نضعها
جميعاً في جعبة واحدة ، مساو لعدد مرات ورود الحرف T . وتساوي
نسبة عدد هذه الأزواج الى عدد كل الأزواج الواردة في النص ، احتمال
ورود الحرف T في النص اي ١٠ ٪ ، نرمز لهذا الاحتمال بالرمز :
$$P(T) = 10\%$$

نلاحظ هنا أن هذه النسبة هي أيضاً نسبة الأزواج المنتهية بالحرف
T كما هي نسبة الأزواج البائدة به .

وبالعودة الى نصنا المثال المحتوي على ١٠٠٠ حرفاً و ١٠٠٠٠
زوجاً ، فإن عدد مرات ورود الزوج TH هو ٣٧٠ ، وهكذا فاحتمال
هو ٣٧٪ ، نرمز لهذا الاحتمال بالرمز TH مصادفة الزوج
ح (H, T) ويكون : $P(H, T) = 37\%$
نجد حسب مثالنا أن الأزواج البائدة بالحرف T والموضوعة في
جعبة واحدة تساوي ١٠٠٠ زوج لان احتمالها هو ١٠ ٪ ، ومن اصل
هذه الأزواج يوجد ٣٧٠ زوج من نوع TH . وهكذا يكون نسبة الأزواج
TH مساوية لـ : $\frac{370}{1000} = 37\%$ نقول حسب ما تقدم أن احتمال

كون الزوج البادئ بالحرف T (وهو الاحتمال الذي هو الزوج TH
نرمز له بالرمز ح (H)) يساوي : $P_T(H) = 37\%$

يدعى هذا بالاحتمال المشروط بكون الحرف التالي للحرف T هو الحرف H .

يمكننا ان نستخدم هذه الاحتمالات المثلة بشكل كافٍ بعدد الأزواج المختلفة في الجعب المختلفة لإنشاء نص انكليزي تتواتر فيه الاحرف والأزواج تواترها في النصوص الطبيعية . نبين فيما يلي طريقة إنشاء هذا النص : نسحب من جعبة ما زوجاً ونكتب حرفيه ثم نسحب زوجاً آخر من الجعبة المخصصة للأزواج البادئة بالحرف الثاني من الزوج الاول المسحوب ونكتب الحرف الثاني من هذا الزوج الثاني المسحوب . نسحب الآن زوجاً ثالثاً من الجعبة المخصصة للأزواج البادئة بالحرف الثاني من الزوج الثاني المسحوب ونكتب الحرف الثاني من هذا الزوج الثالث المسحوب ، ونستمر بهذه العملية وفق نفس الوتيرة ، كما نملأ الفراغ بالحرف تماماً . هناك احتمال خاص ان يلي الفراغ احد الاحرف (انتهاء كلمة ما) وكذا احتمال خاص آخر ان يلي احد الاحرف فراغ ما (بدء كلمة ما) ..

أنشأ شانون مادعاه بالتقريب الثاني للنصوص الانكليزية لدى هذه الطريقة .

٣ - التقريب الثاني (إنشاء الأزواج كما في النصوص الطبيعية الانكليزية)

ON IE ANTISOUTENYS ARE T INCTORE ST BE S
DEAMY ACHIN ID ILONASIVE TUCOOWE AT
TEASONARE FUSO TIZIN ADY TOBE
SEACE CTISBE

أبدع بعض الباحثين فكرة استقصاء ورود التراكيب الثلاثية الاحرف وحسبوا بالمثل احتمالاتها . استخدم شانون هذه الاحتمالات أيضاً لإنشاء مادعاه بالتقريب الثالث للنصوص الانكليزية .

٤ - التقريب الثالث (انشاء التراكيب الثلاثية كما في النصوص الطبيعية الانكليزية)

IN NO IST LAT WHEY ORATICT FROURE BIRS
GROCID PONDENOME OF DEMONSTURES OF THE
REPTAGIN IS REGOACTIONA OF CRE

نلاحظ لدى العودة الى تقريبات شاتون الاربعة اعلاه تشابهها مطرداً مع النصوص الانكليزية الطبيعية . لا نجد في التقريب الاول وهو التقريب الذي يأخذ تواترات الاحرف بعين اعتبار ، التراكيبين OORO و NAH وهما يشبهان نوعاً ما الكلمات الانكليزية . ولدى الانتقال الى التقريب الثاني الذي يأخذ تواترات الانزواج بعين الاعتبار نجد ان كل التراكيب فيه يمكن نطقها ، كما ان التراكيب ANDY AT BE ARE ON ترد في اللغة الانكليزية . واخيراً في التقريب الثالث الذي يعتبر تواتر ورود التراكيب الثلاثية نجد ثمانية كلمات من اللغة الانكليزية ، ومدة كلمات اخرى يطبق منطوقها منطوق الكلمات الانكليزية مثل :

DEMONSTURES PONDENOME GROCID

قام ج. ت. جيلبود بعمل مشابه ولكن في اللغة اللاتينية بدلاً من الانكليزية واستخدم التراكيب الثلاثية وتوصل الى نتائج مماثلة تقتطف منها التراكيب التالية :

IBUS CENT SPITIA VETIS IPSE CUM
VIVVS SE ACETUM DEDENTUR

ونجد من بين هذه التراكيب الكلمات اللاتينية الاصلية التالية :

IPSE CUM SE

يتضح من هذه الامثلة اننا اذا اعطينا الآلة احصائيات حول لغة معينة وكذلك احتمالات ايجاد حرف معين او زمر مؤلفة من حرف او اثنين

او ثلاثة او اكثر ، باعطاء الآلة أيضاً امكانية شبيهة بسحب كرة من جعبة او قذف قطعة نقد او اختيار رقم عشوائي فيمكننا جعل الآلة تنتج نصوصاً اكثر قرباً من النصوص الطبيعية للغة المختبرة . وكلما كانت المعلومات المغطاة للآلة اكثر كمالاً كانت النصوص المصاغة من قبلها شبيهة بالنصوص الطبيعية سواء بمبناها الاحصائي او بالنسبة للعن الانسانية .

اذا جعلنا الآلة تختار زمراً من ثلاثة احرف بالاستناد الى احتمالاتها فلن اي تركيب ثلاثي تقدمه الآلة سيكون كلمة معروفة من اللغة او جزءاً من كلمة معروفة واي تركيب مثني تقدمه في هذه الحالة سيكون كلمة معروفة ان الآلة على كل حال اكثر اتساقاً من الانسان الذي يحدد نفسه عادة بكتابة سلاسل من الاحرف منتقاة بحيث تحمل معاني معينة وهكذا يتجاوز الكثير من التركيبات التي اوردها في التقريبات السابقة . يمكن بالطبع للانسان ومن حيث المبدأ ان يكتب مثل هذه التركيبات الا انه لا يفعل ذلك عادة .

يمكننا تحرير الآلة من عيب تقديم تركيبات الاحرف غير المعروفة في اللغة بجعلها ، اي الآلة ، تختار من بين التركيبات التي يحتوي كل منها على عدد من الاحرف يساوي ما تحويه أطول كلمة معروفة في اللغة . نستطيع تحقيق الهدف ذاته بطريقة أبسط اذا جهزنا الآلة بالكلمات عوضاً عن الاحرف وتركيبها ثم طلبنا منها تقديم الكلمات وفق احتمالات مناسبة .

قدم شانون مثلاً تم اختيار الكلمات فيه بشكل مستقل ولكن بحسب احتمالات ورودها في النصوص الانكليزية ، مثلاً ترد كلمات THE AND MAN وغيرها بنفس تواتر ورودها في النصوص الطبيعية الانكليزية . ولتحقيق هذا المثال نختار نصاً ما ، ثم نكتب كل كلمة وأردة فيه وبشكل منفصل على بطاقة ، نضع البطاقات في جعبة ونخلطها ثم نبدأ بسحب البطاقات واحدة تلو الأخرى ونكتب الكلمات المقابلة وفق ترتيب السحب . يسمى شانون هذه العملية بتقريب الكلمات الاول . وقد حصل في مثال عالجه على ما يلي :

٥ - تقريب الكلمات الاول : تسبب الكلمات هنا بشكل مستقل ولكن وفق تواتراتها المناسبة .

REPRESENTING AND SPEEDILY IS AN GOOD APT
OR CAN COME DIFFERENT NATURAL HERE HE
THE A IN CAME THE TO OF TO EXPERT
GRAY COME TO FURNISHES THE LINE
MESSAGE HAD BE THYSE

لا توجد جداول لاحتمالات ورود أزواج للكلمات في اللغة الانكليزية ،
الا ان شانون انشأ مقطعاً عشوائياً كانت فيه احتمالات ورود أزواج
الكلمات مساوية لما يمكن ان تكون عليه في مقطع طبيعي . بدأ شانون
باختيار زوج من الكلمات من رواية معينة وبشكل عشوائي ، ثم نسخ
الكلمة الثابتة من هذا الزوج على ورقة منفصلة . بحث بعد ذلك في نفس
الرواية عن الورد التالي للكلمة الثانية من الزوج الاول ، ونسخ الكلمة
الواقعة بعد هذا الورد على الورقة المنفصلة ، ثم بحث عن الورد التالي
لهذه الكلمة الاخيرة ونسخ الكلمة التالية لهذا الورد وهكذا . ادت هذه
المعملية بشانون الى ما اسماه تقريب الكلمات الثاني .

٦ - تقريب الكلمات الثاني : حيث احتمالات تنالي الكلمات صحيحة
ولا تستخدم قواعد الانشاء ابعد من ذلك .

دعونا نمنع النظر في كل ما وجدناه . نرد في النصوص اللغوية

THE HEAD AND IN FRONTAL ATTACK ON AN
ENGLISH WRITER THAT THE CHARACTER OF
THIS POINT IS THEREFORE ANOTHER METHOD
FOR THE LETTERS THAT THE TIME OF WHO
EVER TOLD THE PROBLEM FOR AN
UNEXPECTED.

نلاحظ في هذا النص تشكيلات من الكلمات الانكليزية تشابه ، بل
وقد تطابق أحيانا ، ما يرد في نص طبيعي .

دعونا نعمن النظر في كل ما وجدناه . ترد في النصوص اللغوية الحقيقية ، تلك النصوص التي نرسلها عبر لوحة جهاز البرق مثلا ، حروف معينة بتواترات ثابتة تقريبا . تتكرر تراكيب الاحرف الثنائية والثلاثية والرابعة بتواترات ثابتة تقريبا أيضا خاصة كلما ازداد طول النص المعتبر . كذا ترد الكلمات وأزواج الكلمات بتواترات ثابتة . وأخيرا يمكننا انتاج سلاسل من الكلمات أو الاحرف تمكس هذه المواصفات الاحصائية اذا جعلنا - آلة مثلا - تتصدى للأمر باستخدام طرائق رياضية عشوائية .

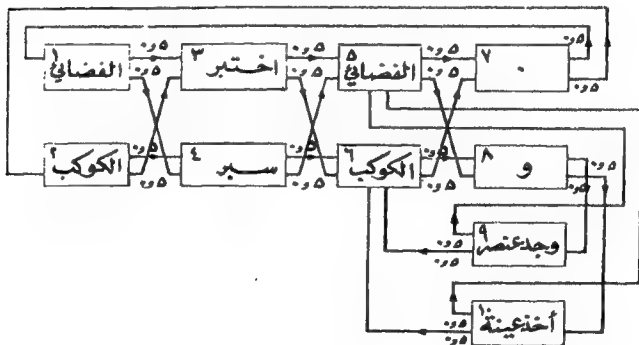
لن نستطيع هذه الطريقة ، مهما طرأ عليها من تحسينات ، أن تنتج كل سلاسل الكلمات التي يمكن للإنسان أن يتفوه بها ؛ وأن دفعها حتى نهايتها القصوى لن يخرج بها عن تراكيب جمالية وردت سابقا ولا لما حملت المعلومات الاحصائية التي قامت عليها اصلا .. ومع ذلك فقد تشكل جملة لم تقل أبدا من قبل .

لا تقتصر احكام اللفة على الاحرف والكلمات فقط ، بل تمتد لها الى اصناف من الكلمات وقواعد ربطها ، أي الى قواعد اللفة . يتوجب في هذا العرض على اللغويين والمهندسين الذين يحاولون بناء آلات مترجمة أن يفوضوا في القواعد ، بحيث تتمكن الآلاتهم من (توليف الكلمات في تشكيلات صحيحة من وجهة نظر القواعد، حتى ولو لم ترد هذه التشكيلات في النصوص اللغوية سابقا) وعلى الآلات أيضا أن تفهم معاني الكلمات الواردة في النص المترجم من سياق ذلك النص) . أن هذه مشكلة كبيرة ومعقدة جدا . أما تحقيق آلة قادرة على انتاج تشكيلات لا نهاية لعددتها من العمل الصحيحة بالنسبة للقواعد ، ولكن غير المفيدة في أكثر الاحوال ، فهو امر بسيط فعلا .

يوضح الشكل ٣ - ١ آلة من هذا الطراز . يمثل كل مستطيل مرقم حالة من حالات هذه الآلة . تدعى هذه الآلة بالآلة منتهية الحالات ، لأن عدد مستطيلاتها أو حالاتها منته .

ينطلق من كل مستطيل عدد من الاسهم الى المستطيلات الاخرى ،
يساوي هذا العدد في آلتنا الخصلة هذه اثنين ، اذ ينطلق سهمان فقط
من كل مستطيل الى مستطيلين آخرين . كذلك فقد تم ارفاق كل سهم
في هذه الآلة بالعدد ٢ ويعني هذا العدد ن احتمال انتقال الآلة مثلا من
الحالة ٢ الى ٣ هو ٢ ، كذلك احتمال لانتقالها من الحالة ٢ الى الحالة
٤ هو ٢ ايضا .

كيف تشغل هذه الآلة ؟ الامر بسيط فكل ما نحتاجه هو سلسلة من
الخيالات العشوائية والتي يمكن الحصول عليها مثلا برمي قطعة نقد
(مرة بعد مرة ، ونصطلح على أن (الطرة) تعني اتباع السهم العلوي
بينما (النقش) يعني اتباع السهم السفلي ويفضي كل من السهمين الى
حالة جديدة من حالات الآلة .. وعندما نبلغ حالة جديدة للآلة ننسخ
الكلمة او الكلمات او الرموز الواردة في المستطيل المحدد ثم (نرمي قطعة
النقد مرة اخرى بهدف الانتقال الى حالة جديدة وهكذا .



الشكل ٢ - ١

اعتمد شانون المصدر المستقر كنموذج رياضي لتمثيل انتاج النصوص.
(وكذلك الرسائل المنطوقة والرئية) . ولا بد لفهم المصدر المستقر من
دراسة المصدر الساكن اولا ، وهذه هي مهمتنا التالية .

يمكس مصطلح المصدر الساكن الفكرة العامة وراء هذا المصدر
فلنتصور آلة تخيلية تنتج على اللوام بعد اقلعها سلسلة الاحرف :
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

فيتضح ان ماسيلي من التاج هذه الآلة يطبق ما سبق لنا فانسب
صفة يمكن ربطها بمصدر هذه الاحرف هي صفة السكون . يمكن ان
نقابل المصدر السكوني هذا بمصدر آخر يقدم بعد اقلعه سلسلة الاحرف:
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

يزداد هنا وعلى اللوام طول السلاسل الجزئية المكونة من حرفي
A B ، C D ، E F ، G H ، I J ، K L ، M N ، O P ، Q R ، S T ، U V ، W X ، Y Z .

ان اي سلسلة من الاحرف يتم اختيارها بشكل عشوائي ووفق
احتمالات محددة تشكل مصدرا ساكنا . سبق ان قدمت التقريبات في
الامثلة ١ ، ٢ ، ٣ امثلة عن المصادر الساكنة لقد غدت الفكرة العلمية
للمصدر الساكن واضحة بما فيه الكفاية الان . اما التعريف الرياضي
الدقيق ففيه قليل من الصعوبة .

تتطلب فكرة سكونية المصدر عدم التغير مع الزمن . ولكن اذا اعتبرنا
مصدرا لازواجا الاحرف يتوقف فيه احتمال الحرف الثاني على الحرف
الاول . وبدانا من الحرف A فان حرفا مختلفة متعددة قد تتالي
بينما اذا بدانا من الحرف Q فان الحرف التالي سيكون قطعاً U .
وبصورة عامة فان نمط انطلاق المصدر سيؤثر على البنية الاحصائية
لسلسلة الاحرف المنتجة ، على الاقل لعدد غير ضئيل من عناصر هذه
السلسلة .

يقترح الرياضي ، بهدف الالتفاف حول هذه النقطة ، اعتبار أكثر من سلسلة من الأحرف يمكن المصدر انتاجها . فالتنا في كل الاحوال آلة تخيلية ، لذا نستطيع ان نتخيل وبمنتهى البساطة انها اقلعت عددا غير منته من المرات منتجة بذلك عدد غير منته من سلاسل الاحرف . يسمى هذا العدد الغير منتهى من السلاسل بمجموعة السلاسل .

نستطيع بدء هذه السلاسل بأي طريقة نشاء ، فمثلا في حالة مصدر لازواج الاحرف ، يمكننا اذا شئنا بدء (نسبة من السلاسل قدرها $1/13$ بحرف E) هذا هو احتمال ورود الحرف E في النصوص الانكليزية) ، وبدء نسبة أخرى من السلاسل نسبتها $2/13$ بحرف W (احتمال الحرف W) وهكذا ، اذا نفذنا ذلك وحسبنا متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف E في مطلع كل منها (وهو $13/13$ بالطبع) وكذلك متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف Z في الموقع الثالث من كل منها وهكذا ، لوجدنا ان هذا المتوسط سيساوي على الدوام $13/13$ ينطبق هذا الامر على اي موقع تختاره في السلسلة وعلى اي حرف آخر غير حرف E ، اذ سيكون على الدوام متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف المختار فيها في موقع معين مساويا لاحتمال ذلك الحرف . ينسحب هذا ايضا على الأزواج ، فمتوسط عدد السلاسل التي يرد فيها زوج مثل TH أو WE في موقع معين من كل سلسلة لا علاقة له بالموقع المختار .

هذا ما نعنيه بمصطلح السكونية اذا ربطنا احتمالات معينة بشروط البدء الخاصة بانشاء مجموعة من سلاسل الاحرف التي يقدمها مصدر توليد للاحرف . واذا قمنا بعد ذلك باجراء أية عملية احصائية عند موقع معين من كل سلسلة . وكانت متوسطات الاحتمالات المحسوبة بالاستناد الى هذه العملية مستقلة عن الموقع الذي جرت عنده العملية الاحصائية ، كان المصدر في هذه الحالة سكونيا . يبلو هذا التعريف غامضا او صعبا بالنسبة للقارئ ، الا ان الصعوبة تبرز عند محاولة اعطاء شكل رياضي دقيق ومفيد لفكرة قد تظهر من جهة أخرى عديمة الفائدة رياضيا .

اعتبرنا في مناقشتنا السابقة لدى دراستنا مجموعة السلاسل الغير منتهية التي يولدها مصدر معين ، المتوسطات عبر كل الاحرف الواردة في الموقع الاول من كل سلسلة ثم عبر كل الاحرف الواردة في الموقع الثاني من كل سلسلة ثم في الموقع الثالث وهكذا وكررنا العمل بعد ذلك بحساب المتوسطات عبر كل الثنائيات الواردة في مواقع مناظرة ثم الثلاثيات وهكذا تبعا . يدعى المتوسط المترتب على مثل هذه الحسابات بمتوسط المجموعة وهو يختلف عن متوسط آخر كنا قد ترمضنا له سابقا في هذا الفصل حيث قمنا بخلط كل الاحرف الواردة في سلسلة واحدة فقط واخذنا المتوسط عبر هذا الخليط ، يدعى مثل هذا المتوسط الاخير بالمتوسط الزمني .

يمكن للمتوسطين الانفي الذكر ان يكونا مختلفين . نفرض على سبيل المثال مصدرا يعطي في لث عدد مرات اقلاعه الحرف A ويصلو بعد كل من هذه الاقلاعات الحرفين A B بالتناوب وفي الثلث الثاني يعطي الحرف B ثم الحرفين A B بالتناوب ، اما في الثلث الثالث فلا يعطي الا الحرف A . تكون السلاسل الممكنة وفق ذلك :

A B A B A B
 B A B A B A
 E E E E E E

يتضح بشكل مباشر ان هذا المصدر سكوني ونسجرج في الجدول التالي الاحتمالات الخاصة به .

احتمال الحرف	المتوسط الزمني السلسلة الاولى	المتوسط الزمني السلسلة الثانية	المتوسط الزمني السلسلة الثالثة	متوسط المجموعة
A	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
B	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
E	0	0	1	$\frac{1}{3}$

إذا كان المصدر ساكناً وكان كل متوسط مجموعي ممكن (الاحرف ، الأزواج ، الثلاثيات وغيرها) مساوياً للمتوسط الزمني المقبل ، دمي المصدر في هذه الحالة مصدراً مستقراً . تنطبق النظريات البرهنة في الفصول المقبلة والمتعلقة بنظرية المعلومات على المصادر المستقرة وتستند برآئتها إلى افتراض أن مصدر الأرسال هو مصدر مستقر . لقد جرى تقدم لا بأس به في مجال ترميز المصادر غير الساكنة إلا أننا لن نعرض لها في هذا الكتاب .

تتناول نظرية المعلومات المصادر المنعزلة التي تولد سلاسل من الاحرف وقد عرضنا لها للتو ، وإلى جانب ذلك تعنى نظرية المعلومات بالمصادر المستمرة التي تصدر اشلالات متغيرة مستمرة كأمواج التخاطب الصوتية أو التيارات الكهربائية المتغيرة المستخدمة في الهاتف . ان هذه المصادر هي من النوع المستقر .

لماذا يشكل المصدر المستقر نموذجاً رياضياً ملائماً ومثراً لدى تطبيقه؟ ان لم يكن لسبب فلاننا نرى بالعودة إلى تعريف المصدر المستقر . ان الاحصائيات الخاصة برسالة مثلاً تبرز تواتر حرف معين كالحرف E أو زوج مثل TH أو تركيب للآني أو غيره ، كل هذه الاحصائيات لا تتغير على طول الرسالة ، وكلما ذهبنا أبعد بالرسالة نحصل على تقديرات أجود لاحتمالات ورود الاحرف المختلفة وزمرها . وبكلمات أوضح : إذا اخترنا مقاطع أطول وأطول من الرسالة نتوصل وعلى الدوام لتوصيف رياضي للمصدر أجود وأجود .

ان الاحتمالات وتوصيف المصدر التي نحصل عليها وفق ما تقدم تنطبق على كل الرسائل التي يولدها المصدر وليس على الرسالة المختبرة فقط ، وسبب ذلك هو تساوي متوسط المجموعة والمتوسط الزمني ..

وهكذا فالمصدر المستقر هو نوع خاص وبسيط من مصادر الرسائل الاحتمالية أو العشوائية ، والعمليات البسيطة أسهل من منظور التناول

الرياضي بالمقارنة مع نظائرها المتقدمة . إلا ان البسطة بعد ذاتها لا تكفي
فالمصدر المستقر لا يمكن أن يكون موضع اهتمام في نظرية الاتصالات
إذا لم يكن واقعياً بدرجة كافية الى جانب بساطته .

يتضح في نظرية الاتصالات جانبين ، يتصف الاول بالدقة الرياضية
البالغة ويمالج المصادر المستقرة الافتراضية والتي نتخيل ان بإمكانها
اصدار مجموعات لا نهاية لها من سلاسل تحتوي كل منها على عدد
لا نهاية له من الرموز . ولنا حرية الخيار كاملة فيما يتعلق اما بدراسة
المصدر بعد ذاته او اختبار المجموعات اللانهائية من الرسائل التي بإمكانه
أن يولدها .

نستخدم النظريات المدرجة في نظرية الاتصالات لتغطية المشاكل
المتعلقة بارسال النصوص اللغوية الحقيقية . ليس الكائن الانساني آلة
رياضية افتراضية فهو لا يستطيع انتاج حتى سلسلة واحدة لا نهائية
من الاحرف ناهيك عن عدد لا نهاية له من المجموعات تحتوي كل منها على
عدد لا نهاية له من هذه السلاسل ..

الا ان الانسان لا يستطيع انتاج سلاسل بالغة الطول من الاحرف ،
ويقدم كل الكتاب مجموعات كبيرة من هذه السلاسل الطويلة . يشكل
جزء من هذه الخرج الهائل من السلاسل البالغة الطول الرسائل التي
ترسل فعلاً عبر لوحة البرق .

وهكذا سنفترض ان مجموع كل الذين يبرقون هو بعد ذاته مصدر
مستقر للرسائل البرقية ، وكذا مجموع كل الذين يتخاطبون عبر الهاتف
هو مصدر مستقر للاشارات الهاتفية . ان مثل هذه الافتراضات تقريبية
بدرجة كافية وهي قابلة للتطبيق لدى من يتكلمون لغة واحدة ، اذ لا يمكن
ان نعتبر كمصدر مستقر مجموع من يستخدمون اللغتين العربية والانكليزية
فالخرج المرتبط بكل من هاتين اللغتين له احتمالاته وحساباته الاحصائية
الخاصة وهي تختلف بشكل جذري عن احتمالات وحسابات الفئة الاخرى

لا يمكننا ان نؤكد ان مجموع الكتاب هو مصدر مستقر للرسائل وفق المعنى الدقيق لهذا المصطلح . اذ تختلف الاحصائيات اللغوية نوما ما باختلاف موضوع النصوص وهدفها ، كما ان اسلوب الانشاء يختلف من شخص لآخر .

نلاحظ ما يشابه ذلك في حالة التخلط عبر الهالف فبعض الناس يتحدثون بنعومة وبعضهم بخشونة ، بينما يقتصر البعض الآخر على اللهجة الخشنة في حالة الغضب فقط . وكل ما نستطيع تأكيد في هذه المجالات اننا نجانب ملحوظا في احصائيات الرسائل كحالة احتمال ورود الحرف e في عينات مختلفة من النصوص الانكليزية .

يجب ان نتذكر على الدوام الفارق الهام بين المصدر المستقر النظري وفق النظرية الرياضية للاتصالات ومصدر الرسائل المستقر التقريبي في العالم الواقعي لنا طينا ان نفرض تحفظات معقولة لدى تطبيقنا خلاصة النظرية الرياضية للاتصالات على المسائل العملية . ولا شك ان كلا منا قد تعود ذلك في مجالات أخرى ، فمثلا نؤكد لنا الرياضيات ان بإمكاننا تحديد مركز الدائرة بدقة اذا اعطينا ثلاثة نقاط منها ، الا انه لا يوجد انسان مائل يفكر بإمكان تحديد مركز دائرة مرسومة للتو على قطعة من الورق وفاقد بعض معالمها بان يلجا مثلا الى ثلاثة نقاط على محيط هذه الدائرة تبعد عن بعضها البعض بأقل من جزء من ألف جزء من السنتيمتر وكل ما يمكن ان يفعله في هذه الحالة هو استخدام بدايته للحصول على تحديد امثل لموقع المركز ومن ثم قياس البعد بين هذا المركز ونقطة واضحة من محيط الدائرة . اوردنا هذا المثال لتبيان نوع الحكم والتحفظ الذي يستخدم عادة عند تطبيق نظرية رياضية دقيقة على حالة عملية .

ومهما كان من امر تحفظاتنا فان تساقلات فلسفية تطرح نفسها سيما واننا قد استخدمنا نموذجا رياضيا احتماليا عشوائيا لتمثيل الانسان كمصدر للرسائل . هل يعني ما فعلناه ان الانسان يتصرف بشكل عشوائي ، ان الامر ليس بهذه البساطة ، وربما لو استطعنا معرفة المرید

عن الإنسان ومحيطه وتلويخه لتمكنا على الدوام من التنبؤ بالكلمة التالية التي سينطقها أو سيكتبها إنسان معين .

نفرض في نظرية الاتصالات أننا نحصل معرفتنا عن مصدر الإرسال إما من الرسائل التي يولدها هذا المصدر أو ربما من دراسة غير متكاملة للإنسان بحد ذاته . وبالأستناد إلى ذلك يمكن أن نظفر ببعض المعلومات الإحصائية التي تساعد في زيادة احتمال معرفة ما يمكن أن تكون عليه الكلمة التالية من رسالة معينة . يبقى هناك منصرفا من الرتبة . يتصرف مصدر الرسائل بالنسبة لنا كما لو أن خيارات معينة كانت تجري بشكل عشوائي ذلك لأننا لا نملك معرفة كاملة بهذا المصدر وهكذا لا يمكننا التنبؤ عما ستكون عليه هذه الخيارات . ولو كان بإمكاننا التنبؤ بها إذن لوطننا معارفنا لسبر غور المعلومات الإحصائية الخاصة بالمصدر . ولو استطعنا تحصيل كم أكبر من المعلومات فكان من الممكن أن نضع يدنا على حقيقة أن تلك الخيارات ليست عشوائية في واقعها بمعنى أنه يمكن التنبؤ بها (وذلك بالاستناد إلى المعلومات التي ليست بحوزتنا) .

نستنتج الآن أن ما عرفناه من الآلات المتناهية الحالات كتلك في الشكل ٣ - ١ كان محدودا فعلا ، فلتلك الآلات دخلها وخرجها ، والانتقال من إحدى حالاتها إلى حالة أخرى لا يجب وبالضرورة أن يتم من خلال خيار عشوائي ، إذ أن مثل هذا الانتقال قد يقرر أو على الأقل يتأثر بمختلف أشكال الدخل لتلك الآلة . وعلى سبيل المثال ، يتقرر عمل الحاسب الإلكتروني ، وهو آلة متناهية الحالات ، بالبرنامج والمعلومات التي يفديه بها البرمج .

يبدو أمرا طبيعيا أن نفترض الإنسان على أنه آلة متناهية الحالات ليس فقط بسبب كونه مصدرا للرسائل يولد الكلمات ، بل في كل جوانب سلوكه الأخرى . نستطيع أن نتصور إذا شئنا أن كل حالات وتشكيلات الخلايا العصبية إنما هي حالات الآلة موضوع البحث (حالات الدماغ ، ربما) . وإذا ذهبنا أبعد من ذلك فتصورنا الانتقال من حالة

لاخرى ، احيانا من طريق اصدار كلمة ، حرف ، أو صوت أو جزء من صوت ، وفي احيان اخرى عن طريق القيام بفعل ما أو جزء من فعل . وهكذا يكون النظر والسمع واللمس وغيرها من الحواس اشكال مختلفة للدخل تقرر أو تؤثر في الحالة التالية التي تنتقل اليها الآلة . اذا كان الانسان آلة متناهية الحالات فعلا ، فعدد حالاته سيتجاوز وبشكل خيالي اي امكانية للاحاطة الرياضية بها . الا أن تشكلات جزئيات الفازات تشابه هذا الوضع إلى حد كبير ، ورغم ذلك نستطيع رصد تصرفات الفاز بمعرفة شغله وحرارته فقط .

هل سنتمكن في أحد الأيام من معرفة العوامل الهامة التي تكمن وراء عمل الدماغ في اصداره للنصوص المكتوبة وباقي النشاطات على حد سواء؟ كما رأينا ، نستطيع التنبؤ وبشكل جيد من البنية الاحصائية للنص الذي قد يقدم انسان ما على كتابته ، الا اذا عمد الانسان المعني للتصرف بشكل مخالف ، وعلى الرغم من ذلك فسيفشل في مجابهة عادته بشكل كامل .

ليست هذه الاعتبارات العامة ، بالطبع ، الهدف الحقيقي لهذا الفصل . فقد انطلقنا للبحث عن نموذج رياضي يكفي لتمثيل الجوانب المختلفة من الكائن الانساني المتعلقة بدوره كمصدر للرسائل ويكفي ايضا لتمثيل النقاط البارزة في الرسائل التي يصدرها . ورأينا بأخذ النصوص الانكليزية كمثال ان تواترات ورود كل الاحرف ثابتة بشكل ملفت للنظر الا اذا رغب الكاتب ان يتحاشى بعض الاحرف بشكل متعمد . وبالمثل فتواترات ورود انواع ولاتيات الاحرف والزمزر الاعلى ايضا بما فيها الكلمات ، هي ثابتة بدورها .

ورأينا أيضا كيفية توليد سلاسل من الاحرف بتواترات تقابل ما يرد في النصوص الانكليزية باستخدام عمليات عشوائية احتمالية مختلفة كنقل كلمات أو احرف نص ما على بطاقات منفصلة ، ثم خلط البطاقات وسحبها بعد ذلك واحدة تلو الأخرى واستخدام ما يرد في كل واحدة لتكوين السلسلة المتباعدة . تستطيع العمليات العشوائية الأكثر تقدما كذلك التي تنفذها الآلات المتناهية الحالات ، ان تنتج تقريبا أكبر للنصوص الطبيعية الانكليزية .

وهكذا يمكننا اعتبار العملية العشوائية المعممة كنموذج لمصدر رسائل كممثل لمصدر يولد النصوص الانكليزية . ولكن كيف نستطيع تعريف أو تحديد العمليات العشوائية رياضياً بحيث نتمكن من اثبات النظريات الضرورية لترميز الرسائل المولدة من قبل المصدر ؟ يجب بالطبع ان نختار التعريف بحيث يأتي متسقاً مع خصائص النصوص الانكليزية الفعلية .

ان المصدر المستقر هو صنف المصدر العشوائي الذي يتم اختياره كنموذج لمصدر الرسائل الفعلي . ويمكن النظر للمصدر المستقر كحالة افتراضية تنتج عدداً لا نهاية له من مجموعات تحوي كل منها عدداً لا نهاية له من سلاسل من الاحرف لا نهائية . يمكننا القول وبشكل مقبول ان الاحصائيات المرتبطة بسلاسل الاحرف او الرسائل التي ينتجها مصدر مستقر لا تتغير مع الوقت ، فاللصدر اذن متوازن فعلاً . وأكثر من ذلك ، ففي حالة المصدر المستقر تنطبق الاحصائيات المستمدة من رسالة معينة على سائر الرسائل التي يولدها المصدر نفسه .

نبرهن الاستنتاجات المتعلقة بنظرية الاتصالات من اجل المصادر المستقرة الافتراضية . يشكل كل الكتاب مصدراً مستقراً تقريباً للنصوص لا يفترق المصدر المستقر الافتراضي عن المصدر المستقر الفعلي الا قليلاً ، لذا نستطيع تطبيق رياضيات الاول على الثاني والحصول على نتائج مفيدة . الا اننا يجب ان نأخذ ما يلزم من الحذر عند تطبيق احكام نظرية الاتصالات الرياضية المصفاة لمصادر افتراضية ، على المشاكل الفعلية للاتصالات .



الفصل الرابع

الترميز ونظام الرسائل

يمكن أن يكون المصدر المعلوماتي نصاً مكتوباً ، انساناً يتكلم ، أصوات جوقة موسيقية ، صوراً ، أفلاماً سينمائية ، أو مشاهد يمكن تسديد الكاميرا التلفزيونية ناحتها . رأينا ، أنه وفق نظرية المعلومات ، تعتبر هذه المصادر مالكة لخصائص المصادر المستقرة التي تولد الأحرف ، الأعداد ، أو الإشارات الكهربائية . أن الهدف الرئيسي لنظرية المعلومات هو دراسة كيفية ترميز سلاسل الأحرف والإشارات هذه بأكثر فعالية ممكنة وبوسائل كهربائية عموماً ، وذلك لإعدادها للإرسال .

لقد سمع الجميع عن الرموز وترميز الرسائل ، أو ما يسمى بالشفرة . وتزخر المكتبات بقصص الأبطال الخياليين الذين يستخدمون الرسائل المرمزة السرية لتنفيذ أعمالهم الخارقة .

استخدمت الكتلة السرية بمعناها التاريخي الرموز لإخفاء مضامين الرسائل الهلعة عن كل الذين لم تكن تلك الرسائل تقصدهم . ويمكن تنفيذ ذلك بتبديل كلمات الرسائل بكلمات أخرى مقابلة وفق قاموس ترميز معين . وفي طريقة أخرى للترميز هي طريقة التشفير يستعاض عن الأحرف والأعداد بأحرف أخرى وفق اتفاق بين الأطراف المعنية .

تعد فكرة الترميز ، أي فكرة تمثيل شيء بأخر ، في مجالات أخرى أيضاً . يعتقد علماء الوراثة أن الخطة الشاملة لعمل الجسم الانساني

مكتوبة في الموروثات المدفونة في الخلية التناسلية ويؤكدون أن النص الوراثي يتكون من ترتيب خطي لأربع وحدات داخل حمض الـ DNA المكون للموروثات . ينتج هذا النص بدوره نصاً مكافئاً في حمض الـ RNA ، حيث يتم بواسطة هذا الأخير تصنيع البروتينات من عشرين نوع من الحموض الأمينية . وقد جرت دراسات معمقة لفهم الطريقة التي يعاد وفقاً لترميز رسالة الـ RNA الوراثية ذات الأربع مقاطع بحيث تحول إلى رسالة البروتين ذات العشرين مقطع .

توصل علماء الوراثة إلى هذه الاعتبارات بسبب وجود نظرية المعلومات . أدت دراسة انتقال المعلومات لفهم جديد وهام لمسائل الترميز ، وهو فهم على جانب كبير من الأهمية سواء في مجال ترميز الرسائل ، أو مجال ترميز المعلومات الوراثية .

استعرضنا في الفصل الثاني كيفية ترميز نص لفوي وفق طريقة مورس باستخدام نبضات كهربائية طويلة وقصيرة تفصل بينها فواصل طويلة وقصيرة . كان ذلك مثال بسيط للترميز . ترى نظرية المعلومات في الأمواج الكهرومغناطيسية التي ترتحل من ذار الانداعة وحتى الراديو في كل منزل أسلوباً في ترميز الموسيقى وسواها مما نسمعه لدى إدارتنا مفتاح جهاز الراديو . وكذلك شأن التيارات الكهربائية في أسلاك الهاتف فهي ترميز للخطاب المتبادل وأخيراً فأمواج الانضغاط والتخلخل في الهواء الناقلة للصوت ما هي إلا ترميز لحركات الحبال الصوتية التي تصدر الأصوات .

حددت الطبيعة ترميز حركات الحبال الصوتية على شكل أصوات التخاطب إلا أنه يمكن لمهندس الاتصالات اختيار طريقة الترميز التي سيتمثل بواسطتها أصوات التخاطب بتيارات كهربائية ، تماماً كما يختار نظام النقاط والخطوط والفواصل لتمثيل الأحرف الأبجدية في الإرسال البرقي . ويسمى هذا المهندس لتحقيق أفضل ترميز ممكن ، وللوصول إلى هذه الغاية لا بد من وجود معيار يفصل المهندس بواسطته بين الترميز

الفعال والترميز السيء كما وأن هذا المهندس يجب أن يمتلك النظرة
الثابتة لإنجاز الترميز النشود . سبق أن تعلمنا بعض هذه الأمور في
الفصل الثاني .

أدت دراسة هذه المشكلة بالذات ، وهي دراسة قد تبدو بعد ذاتها
محدودة ، الى تطوير أفكار هامة عبر نظرية المعلومات ، تتجسد أكثر
ما يمكن في مجال الترميز سواء في إصدار الرسائل السرية أو كشف
الشفيرة الوراثية . تضمنت هذه الأفكار معياراً للكم المعلوماتي هو
الانتروبي ووحدة لقياس المعلومات هي البيت Bit . .

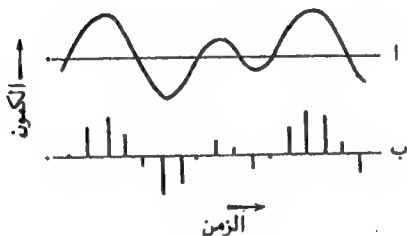
أميل الى الاعتقاد في هذه المرحلة أن القارئ قد أصبح في وضع
المطالبة الملحة . لمعرفة معنى (الكم المعلوماتي) كما يقاس بالبيت ، ولذا
كان هذا هو حاله فعلاً ، فأرجو أن يجعله حماسه عبر كميات من المعلومات
الوسيلة تتناول ترميز الرسائل .

لعله امر بديهي أن احداً ما لن يستطيع فهم وتقييم حل مسألة معينة
إلا اذا كان لديه فكرة عن المسألة بعد ذاتها . لن يستطيع أي منا شرح
الموسيقى لشخص لم يسمع في حياته أي عمل موسيقي . أشعر بشكل
معادل أنه كي نستطيع تقييم الحاجة لقياس الكم المعلوماتي وفهم معناه
لا بد لنا من المتناول التفصيلي لكيفية ترميز الرسائل بنية بثها برقياً .

نلجأ الى الأمثلة البسيطة بنية فهم مشكلة الترميز . ونهدف في
النهاية بالطبع الى تعلم ما له فائدة واسعة ، وعند ذلك نتوقع
بعض الصعوبات .

تتكون بعض الرسائل الهامة من سلاسل من الأحرف المنفصلة
كأحرف الأبجدية المتتالية أو الأعداد المتتالية في خرج الكمبيوتر .
لقد بينا فيما سبق أن أنواعاً أخرى من الرسائل تختلف بشكل جذري .

ان الأصوات والموسيقى هي تغيرات ضغط الهواء عند اذن السامع .
 تمثل هذا الضغط وبدرجة كافية من الدقة لدى استمعائنا الهاتف
 بتغيرات كمون اشارة كهربائية مرتبطة عبر الاسلاك أو بكمية اخرى
 مناسبة . يمثل الشكل ٤ - ١ تغير مثل هذه الاشارة مع الزمن حيث
 نفرض ان الاشارة هي عبارة عن كمون كهربائي متغير مع الوقت ، كما
 يوضح الخط المتعرج .



الشكل ٤ - ١

تصبح نظرية المعلومات محدودة الاهمية اذا لم تكن قابلة التطبيق
 على الرسائل والاشارات المستمرة ، كقابليتها للتطبيق على الرسائل
 المنزلة ، كالنصوص اللغوية .

ستحضر نظرية المعلومات لدى تناولها الاشارات المستمرة نظرية
 رياضية هي نظرية العينات ، وستقوم باستخدامها دون برهانها . تنص
 هذه النظرية على انه يمكننا تمثيل الاشارة المستمرة بشكل كامل وكذلك
 اعادة انشائها بكل تفاصيلها اذا توفر لدينا عينات أو قياسات لسمتها

منجزة عند لحظات زمنية تفصل بينها فترات متساوية . يجب أن تكون هذه الفترة مساوية أو أقل من نصف دور أعلى تواتر متواجد في الإشارة .
والذا عدنا الى الشكل ٤ - ١ الممثل لإشارة متغيرة مع الزمن فإن العينات المطلوبة في حالة هذه الإشارة يمكن تمثيلها بخطوط شاقولية كما هو موضح في القسم الأسفل من نفس الشكل . .

يجب أن نلاحظ أن قدرة هذه العينات على تمثيل الإشارة بشكل كامل تتوقف على توفر عدد كبير منها بدرجة كافية . نحتاج في حالة تواترات الصوت المحصورة بين . و ٤٠٠٠ هـ ف ث الى ٨٠٠٠ عينة . في كل ثانية ، أما في الإشارة التلفزيونية التي يتراوح تواترها بين . الى ٤ ملايين هـ ف ث فنحتاج الى ٨ ملايين عينة في كل ثانية . وبصورة عامة اذا كان عرض مجال تواتر الإشارة هو س هـ ف ث ، فنحتاج على الأقل لـ ٢ س عينة في كل ثانية لتوصيف هذه الإشارة بشكل كامل .

وهكذا يمكننا نظرية العينات من تمثيل إشارة مستمرة بسلسلة من العينات مختلفة السمات . تختلف هذه السلسلة ، على كل حال ، عن سلسلة الأحرف أو الأرقام ، فهناك عدد من الأرقام (٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩) والأحرف (الأحرف الأبجدية) بينما يمكن للعينة أن تتضمن عدداً لا نهاية له من السمات المختلفة . أن كل سمة في عينة يمكنها أن تقع في أي نقطة من مجال مستمر من القيم ، بينما لا ينتقى الرقم أو الحرف إلا من مجموعة محددة من العناصر المنعزلة .

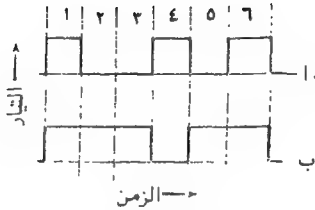
إذا اعتبرنا الطريقة التي تتعامل بها نظرية المعلومات مع العينات ذات المجال المستمر من السمات فإننا هذه الطريقة تشكل بحثاً بعد ذاته ستعود اليه فيما بعد . سنقتصر هنا على ملاحظة مفادها أنه ليس من الضروري أن توصف الإشارة أو تستعمل بشكل كامل ، ففي الأجهزة

الفيزيائية الواقعية لا يمكن استرجاع الإشارة بصيغتها الأصلية . وتكتفي في إرسال الأصوات مثلا بتمثيل سعة العينة بدقة ١٪ . وهكذا يمكننا ، إذا رغبنا ، قصر أنفسنا على الأعداد بين ٠ الى ٩٩ في مجال توصيف سمات عينات الأصوات المتتالية وتمثيل سعة عينة محددة بأحد الأعداد المئة المذكورة حيث ستكون بذلك قريبة من السعة الحقيقية بدرجة كافية . نستطيع بواسطة عملية تجزئة الإشارة الى عينات الحصول على تمثيل شبيه بحالة الإشارات المنعزلة المثلة لنص لقوي .

استطعنا باستخدام العينات المحددة القيم تحويل مسألة ترميز إشارة مستمرة كالصوت مثلا الى مسألة أبسط هي ترميز اشارات منعزلة كالحرف للنصوص اللغوية .

وأينا في الفصل الثاني ان النصوص اللغوية يمكن بثها حرفا بحرف باستخدام طريقة مودس في الترميز ، وبطريقة مماثلة يمكن بث هذه الرسائل عبر لوحة المبرقة . ان ضبط أحد أزرار هذه اللوحة يؤدي الى امرار سلسلة من النبضات الكهربائية والفواصل عبر الدارة . عندما تصل هذه النبضات والفواصل جهاز الاستقبال تحرض الزر المقابل فتطبع اذ ذاك الآلة الحروف المرسل .

تشكل قطارات النبضات والفواصل طريقة عامة ومفيدة لتوصيف أو ترميز الرسائل . وعلى الرغم من أن شيفرة مودس ورموز المبرقة تستخدم نبضات وفواصل من أطوال مختلفة فإنه بالتقابل يمكن بث الرسائل باستخدام النبضات والفواصل المتساوية الطول الرسالة عبر فترات زمنية متساوية . يوضح الشكل ٤ - ٢ كيف يمكننا أن نستخدم النبضات والفواصل المتساوية في تشكيل إشارتين مختلفتين ، تتكون كل منهما من ستة فترات ، فاما الإشارة ١ فتتكون من : نبضة - فاصل - فاصل - نبضة - فاصل - نبضة ، في حين تتكون الإشارة ٢ من : نبضة - نبضة - نبضة - فاصل - نبضة - نبضة .



الشكل ٤ - ٢

يحدد وجود نبضة أو فاصل في فترة معينة إحدى إمكانيتين ، فيمكننا بذلك من الاستخدام أي زوج من الرموز لتمثيل النبضة والفاصل ، ونجد من بين أزواج هذه الرموز : نعم - لا ، + - ، - - ، ١ - ٠ .

وبذلك نمثل الإشارة ٢ على النحو :

نبضة	فاصل	نبضة	فاصل	نبضة	فاصل
نعم	لا	نعم	لا	نعم	لا
+	-	+	-	+	-
١	٠	١	٠	١	٠

يتسم التمثيل باستخدام الرمز ٠ ، ١ بكونه هام وملائم بشكل خاص ، إذ يمكن استخدامه لربط قطارات الأمواج بنظام العد الثنائي . عندما نكتب العدد ٢١٥ نعني :

$$\begin{aligned}
 & 1 \times 100 + 1 \times 10 + 5 \times 1 = 215 \\
 & 1 \times 100 + 1 \times 10 + 5 \times 1 = 215
 \end{aligned}$$

نستخدم في النظام العشري المتباد هذا الأرقام العشرة : ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ . أما في النظام الثني فنستخدم الرقمين ٠ ، ١ . وهكذا عندما نكتب في هذا النظام ١٠٠١٠١ فإنما نمني :

$$\begin{array}{cccccc} & ١ & ٢ & ٣ & ٤ & ٥ \\ ٢ \times ١ + ٢ \times ٠ + ٢ \times ١ + ٢ \times ٠ + ٢ \times ٠ + ٢ \times ١ \\ ٣٧ = ١ \times ١ + ٤ \times ١ + ٣٢ \times ١ = \end{array}$$

في النظام العشري

قد يكون من المناسب أحيانا كتابة الأعداد وإضافة أصفار الى يسارها ، ان هذا لا يغير من قيمة العدد . وهكذا في النظام العشري :

$$١٦ = ٠٠١٦$$

أما المساواة المقابلة في النظام الثني فهي :

$$١٠٠٠٠ = ٠٠١٠٠٠٠$$

يديم كل من الرقمين ٠ أو ١ في النظام الثني برقم مثنى . اذا أردنا توصيف النبضات أو الفواصل الواردة في ستة فترات متتالية نستخدم ستة أرقام ثنائية مناسبة . ولما كانت النبضة أو الفاصل في فترة واحدة تكافئ رقم مثنى ، نستطيع ان نتحدث في هذه الحالة عن زمرة نبضية من ستة أرقام ثنائية ، كذلك يمكننا ان نشير الى نبضة أو فاصل في فترة معينة على انه رقم مثنى .

دعونا نبحث عن عدد الإشارات الممكنة والمختلفة باستخدام ثلاثة ثلاثة فترات متتالية نعلم كل منها بنبضة أو فاصل ، بكلمة أوضح ما هو عدد الأعداد في النظام الثني التي يتكون كل منها من ثلاثة أرقام ثنائية .

ان هذه الأعداد هي ببساطة :

العدد بالنظام الثني	المقابل العشري
...	٠
٠.١	١
٠.١٠	٢
٠.١١	٣
١.٠٠	٤
١.٠١	٥
١١.٠٠	٦
١١١	٧

٢
 إذن فعدد الأعداد المطلوبة هو ثمانية ونلاحظ أن $8 = 2^3$ ، وبصورة
 ن
 أمم فعدد الأعداد الثنائية المكون كل منها من ن رقم مثنى هو : ٢
 نوضح في الجدول التالي عدد الأعداد الثنائية المكون كل منها من ن
 رقم مثنى وذلك من أجل بعض قيم ن :

ن (عدد الأرقام الثنائية المستعملة) عدد الأعداد الناتجة (نماذج من ن رقم مثنى)

١	٢
٢	٤
٣	٨
٤	١٦
٥	٣٢
١٠	١٠٢٤
٢٠	١٠٤٨٥٧٦

نلاحظ أن عدد الأعداد الناتجة أو عدد النماذج المكونة من ن رقم مثنى
 يزداد بسرعة كبيرة جداً وسبب ذلك أننا نضاعف العدد المطلوب في كل مرة
 نضيف مكان جديد في العدد المكون ، فعندما نضيف رقم نحصل على كل
 الأعداد السابقة مسبقة بـ ٠ . وكذلك كل الأعداد السابقة مسبقة بـ ١ .

يشكل النظام الثماني البديل الوحيد للنظام العشري ، إذ أن النظام الثماني أهمية خاصة لدى بناة أجهزة الكمبيوتر . يستخدم النظام الثماني الأرقام الثمانية : ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ . عندما تكتب ٣٥٦ في النظام الثماني نعني :

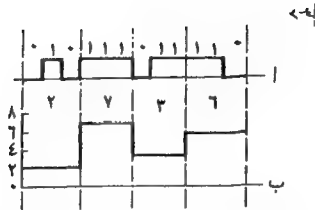
$$\begin{aligned} & 1 \times 6 + 8 \times 0 + 8 \times 2 = 356 \\ & 1 \times 6 + 8 \times 0 + 64 \times 2 = \\ & 228 = 6 + 40 + 192 \end{aligned}$$

نستطيع التحويل بين النظامين الثماني والثنائي بسهولة فائقة ، إذ ما علينا إلا استبدال كل تركيب من ثلاثة أرقام ثنائية بمقابلها الثماني كما في المثال التالي :

٠١٠	١١١	٠١١	١١٠	ثماني
٢	٧	٣	٦	ثنائي

يفضل من يستخدمون الكمبيوتر استظهار ومن ثم استدكار الأرقام من النظام الثماني على التعامل مع السلاسل الطويلة من الأرقام الثنائية . أنهم يتعلمون تمييز زمر ثلاثية من الأرقام الثنائية والتعامل مع كل زمرة كوحدة ، وهكذا ينظرون إلى تسع أرقام ثنائية على أنها ثلاثة زمر ويشكل أوضح سلسلة من ثلاثة أرقام ثمانية .

أنه أمر ممتع حقاً أن نتناول سلاسل النبضات والفواصل وفق نفس المنظور أي أنها تمثل ملاسل من الأرقام الثنائية ، وبالتالي فسلسلة من نبضات ذات سمات مختلفة تقابل سلسلة من الأرقام الثمانية : ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ . يوضح ذلك الشكل ٤ - ٣ . حيث نرى في القسم أ منه سلسلة من الإرسال - التوقف ، أو الوصل - فصل ، أو ١ - ٠ . مقابلة للمعد الثماني : ١٠١١٠١١١٠١٠٠ . أما العدد الثماني القابل فهو : ٢٧٣٦ ، بينما في القسم ب تمثيل آخر للمعد كاربعة نبضات لها السمات التالية : ٦ ٣ ٧ ٢ .



الشكل ٤ - ٢

ان التحويل من النظام المثنى الى النظام العشري ليس امراً سهلاً . ويحتاج تمثيل كل رقم عشري حوالي ٢٠٢٢ رقم مثنى . يمكننا بالطبع تخصيص اربع ارقام مثنى لكل رقم عشري ، كما هو مبين في الجدول التالي الا ان ذلك يعني ضياع بعض التشكيلات دون استخدام ، فهناك من تلك التشكيلات اكثر مما يلزمنا :

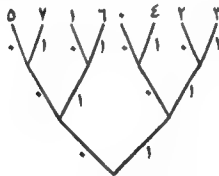
الرقم العشري	العدد المثنى
٠	٠٠٠٠
١	٠٠٠١
٢	٠٠١٠
٣	٠٠١١
٤	٠١٠٠
٥	٠١٠١
٦	٠١١٠
٧	٠١١١
٨	١٠٠٠
٩	١٠٠١
غير مستعمل	١٠١٠

غير مستعمل	١٠١١
غير مستعمل	١١٠٠
غير مستعمل	١١٠١
غير مستعمل	١٠١٠
غير مستعمل	١١١١

إن اعتبار سلاسل النبضات والمقواصل أو سلاسل ٠ و ١ على أنها أرقام ثنائية هو اعتبار ملائم جداً ، يتيح لنا ذلك معرفة عدد السلاسل المختلفة وكذلك أسس التقابل بين أنظمة العدد الثلاثة : الثنائي والشماني والعشري . ألا يهمننا عند إرسال المعلومات العدد المقابل لسلسلة أرقام ثنائية ، إذ يكفي فقط أن نرسل الأرقام الثنائية الممثلة لعدد ثنائي بصرف النظر عن هذا العدد ، فمثلاً نرسل ٠ ٠٠١ ٠٠٠ ٠١٠ ٠١١ ١١٠ ١٠١ ١٠٠ ١١ ٠١١١ ولا يهمننا النظائر الثمانية ٠ ١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ ٧ .

يمكننا اعتبار التقابل بين النظام الثنائي وسواء بطريقة أخرى ، وتغطي هذه الطريقة على تجاهل كون هذه الأرقام ممثلة لأعداد ثنائية واستخدامها بدلاً من ذلك لاختيار أو تحديد رمز معين .

يمثل كل ورود للصفر أو الواحد امكانية الخيار بين احتمالين .
نعتبر مثلاً شجرة الاختيار الموضحة في الشكل ٤ - ٤ .



الشكل ٤ - ٤

عندما نتحرك الى الأعلى بدءاً من الجذر الى الفروع فان ورود الصفر
يعني اختيار الفرع الايسر بينما نختار الفرع الايمن اذا صادفنا الواحد.
وهكذا تعني السلسلة ١٠١ . التحرك وفق الاتجاهات التالية : يسار ،
يمين ، يمين وهذا يجعلنا الى الرقم الثماني ٦ .

تعطينا ثلاثة ارقام ثنائية المعلومات الكافية لاجراء اختيار معين من
بين ثمانية امكانات مختلفة ، وبالمثل تعطينا اربعة ارقام ثنائية المعلومات
الكافية لاجراء اختيار معين من بين ١٦ امكانية مختلفة ، ويرتفع هذا
الرقم الى ١٠٤٨٥٧٦ امكانية مختلفة في حالة توفر ٢٠ رقم مثنى .
ونحصل على الامكانات المختلفة في كل حالة بتوزيع الارقام الثنائية وبكل
الاشكال الممكنة في الخانات المعتبرة للعدد المثنى (٢ - ٤ - ٠٠٠ -
٢٠ - الف) .

ليس ضرورياً ان تكون تلك الخانات اعداداً ثنائية . فقد بدأنا
دراستنا ببحث كيفية ترميز النصوص اللغوية بهدف ارسالها برقياً
بواسطة ملاسل من النبضات الكهربائية. والفواصل والتي يمكن بدورها
ان تمثل بأرقام ثنائية .

يحتاج ارسال النصوص الانكليزية حرفاً بحرف الى ٢٦ حرف وفراغ
اي ٢٧ رمز ، هذا اذا لم نأخذ بعين الاعتبار الرموز الخاصة كالفواصل
وغيرها .

يمكننا ان نكتب الاعداد بكلمات وان نهمل رموزها (مثلاً نكتب ثلاثة
موضاً من ٢) ، ونستخدم كلمات للتعبير عن الرموز الخاصة (مثلاً
نكتب فاصلة موضاً عن ٢ ، نقطتين موضاً عن ٢٠ وهكذا) .

تقول الرياضيات ان الاختيار من بين ٢٧ رمز يحتاج من الارقام
الثنائية ما يساوي عدده ١٧٥ رقم مثنى . اذا لم تكن معينين كثيراً
بالكفاءة العالية فنستطيع تخصيص عدد مثنى مكون ٥ ارقام ثنائية لكل
حرف وهذا يشكل فائضاً من الاعداد الغير مستخدمة يساوي ٥ اعداد
ثنائية مكون كل منها من ٥ ارقام ثنائية .

تمتلك بعض الآلات الكتابة ٤٨ زر مختلف بما في ذلك الرفع وزر «الغلق» ، ويمكن ان نضيف اليها آليتي التقدم بسطر واحد والعودة الى اول السطر . يمكن ان ارمز نشاطاتي باستخدام كل امكانات الآلة الكتابة (باستثناء وضع الورق اللازم في الآلة) وذلك باجراء خيارات متتالية من اصل الـ ٥٠ خيل المتوفر ، حيث يقابل كل خيل ٦٢٠٠ رقم مثنى . وكالمعادة يمكن ان نستخدم ٦ ارقام ثنائية لكل زر من ازرار الآلة ونهتدز بنتيجة ذلك بعض سلاسل الارقام الثنائية .

يتكون هذا الفائض بسبب وجود ٣٢ عدد مثنى من الاعداد المؤلفه من ٥ ارقام ثنائية وهو عدد قليل ، بينما يوجد ٦٤ عدد مثنى من الاعداد المؤلفه من ٦ ارقام ثنائية وهذا كثير الى حد ما . كيف يمكن ان نتعاضى مثل هذا الهدر ؟ اذا اعتبرنا ٥٠ رمز مختلف فانه يمكننا تكوين ١٢٥٠٠٠ زمرة متباينة تتكون كل زمرة منها من ثلاثة من هذه الرموز . واذا عدنا الى الارقام الثنائية فنستطيع ان تكون ١٣١٠٧٢ تركيب مختلف بحيث يحتوي كل تركيب على ١٧ رقم مثنى . وهكذا اذا جزئنا النص الى زمرة من ٣ احرف متتالية واذا ربطنا كل زمرة منها بعدد مثنى مكون من ١٧ رقم مثنى فنحصل على ترميز جيد وقيض لدينا القليل . اما اذا ملنا كل حرف ب ٦ ارقام ثنائية لاحتجنا ١٨ رقم مثنى في تمثيل ٣ احرف متتالية ، وهكذا فلن طريقة الترميز الاولى خففت من استخدامنا للارقام الثنائية بنسبة $\frac{١٧}{١٨}$.

يمكننا بالطبع ترميز النصوص الانكليزية بشكل مغاير تماما . ونستطيع استخدام اللغة الانكليزية بشكل فعال اذا احطنا بمعاني حوالي ١٦٣٨٤ كلمة وهو قاموس جيد من الكلمات . يعود اصل هذا الرقم الى اننا نعلم ان هناك ١٦٣٨٤ عدد مثنى يتكون كل منها من ١٤ رقم ثنائي . وهكذا بتخصيص ١٦٣٥٧ من هذه الاعداد لتمثيل الكلمات المستخدمة الضرورية وباقي الـ ٢٧ لتمثيل الاحرف والفراغ ، لحصلنا على ترميز جيد سيما وان وجود الاحرف سيفسح المجال لاستخدام

كلمات إضافية لم نلاحظها في القاموس المكون من ١٦٢٥٧ كلمة . ليس من الضروري أن نضع فراغاً بين الكلمات التي تقابلها رموز عديدة إذ يمكن أن نفترض أن الفراغ هو جزء من كل كلمة .

إذا برزت الحاجة لاستخدام بعض الكلمات بشكل غير متواتر ، فيتوجب علينا أن نستخدم ١٤ رقم مثنى لكل كلمة في هذا النوع من الترميز . تشير المعدلات الإحصائية إلى أن وسطي عدد الأحرف في كل كلمة من كلمات اللغة الإنكليزية هو ٥.٥ حرف . ولما كان من المفروض أن تفصل الكلمات بفراغات عندما نبث الرسالة حرفاً بحرف يرتفع هذا العدد إلى ٥.٥ حرف حتى في حالة إهمالنا بعض الاستخدامات الخاصة في النص كإيراد الأحرف الكبيرة وتوضيح الفواصل . إذا خصصنا ٥ أرقام ثنائية لكل حرف فسيلازمنا ٢٧٥ رقم مثنى لكل كلمة ، بينما نحتاج فقط لـ ١٤ رقم مثنى لكل كلمة إذا لجأنا لترميز الكلمات بدلاً من الأحرف وقمنا ببثها كلمة بكلمة .

كيف يمكن أن يحدث ذلك ؟ إذا عمدنا لبث الرسالة حرفاً بحرف فنستستخدم إمكانات متكافئة الإرسال كل سلاسل الأحرف الإنكليزية ، أما الإرسال كلمة بكلمة فسيقتصر الأمر على الكلمات الإنكليزية وحسب .

إن عدد الأرقام الثنائية الضرورية لترميز كل كلمة من النصوص الإنكليزية يتوقف إلى حد بعيد على طريقة الترميز المعتمدة .

إن النصوص اللغوية هي نوع من جملة أنواع أخرى من الرسائل قد نرغب ببثها . تشتمل الأنواع الأخرى على سلاسل الأرقام ، الصوت البشري ، الصور المتحركة أو الصور الثابتة . وهكذا فإذا كانت هناك طرق فعالة وأخرى غير فعالة لترميز النصوص اللغوية ، فننتوقع بالمقابل أن يكون هناك طرق فعالة وأخرى غير فعالة في ترميز الرسائل الأخرى .

بغمرنا اعتقاد كبير بأنه يوجد من حيث المبدأ طريقة مثلى لترميز الإشارات الصادرة عن منبع للرسائل ، مثل هذه الطريقة ستحتاج عدداً أصغرياً من الأرقام الثنائية لكل حرف ولكل واحدة من زمن الإرسال .

إذا توفرت مثل هذه الطريقة المثلى لترميز الإشارة ، فنصطلح على استخدام العدد الوسيط للأرقام الثنائية اللازمة لترميز الإشارة كمعيار للمحتوى المعلوماتي أو لكم المعلوماتي في كل حرف أو كمعيار للكم المعلوماتي الذي يولده في كل ثانية مصدر الرسائل الذي أعطى الإشارة المعتبسة .

هذا ما نفعله بالضبط في نظرية المعلومات ، أما كيفية تحقيق الفعل وأسبابه فسنتركها للفصل القادم .

أما الآن ، فسنراجع وبسرعة ما قدمناه في هذا الفصل . نعتبر الترميز في نظرية المعلومات كقضية أساسية ، والترميز ببساطة هو تمثيل إشارة بغيرها . وهكذا تمثل أمواج الراديو أصوات التخاطب وبهذا فهي ترميز لتلك الأصوات . يمكننا بحث الترميز ببساطة وعمق في حالة مصادر الرسائل المتقطعة والتي تولد رسائل مؤلفة من سلاسل من الأحرف أو الأرقام . أما عن الإشارات المستمرة ، فلأمر أعقد لأنه لحسن الحظ نستطيع تمثيل الإشارة المستمرة بعينات من سماتها وذلك باستخدام عدد من العينات في كل ثانية يساوي ضعف أعلى تواتر للإشارة ، وخير مثال على الإشارات المستمرة التيارات الكهربائية في خطوط الهاتف . بل ونستطيع أكثر من ذلك ، فبإمكاننا تمثيل سمات هذه العينات بأعداد صحيحة .

إن أهم طرق ترميز الأحرف أو الأعداد في نظرية الاتصالات هي تلك التي تعتمد سلاسل من القطع والوصل والتي بدورها يمكن أن تمثل بالأرقام الثنائية . ١٠٤ . وكمثال على ذلك : إذا استخدمنا سلاسل من زمر بحيث تتكون كل زمرة من ٤ أرقام ثنائية نستطيع تكوين ١٦ عدد ثنائي نخصص منها ١٠ لتمثيل الأرقام العشرية ، وإذا رفعنا محتوى كل زمرة إلى ٥ أرقام ثنائية ارتفع عدد الأعداد الثنائية المكونة إلى ٣٢ ، نجتزئ منها ٢٧ لتمثيل الأبجدية في اللغة الإنكليزية مع فراغ مضاف . باختصار نستطيع إرسال الأعداد العشرية والنصوص اللغوية ببث سلاسل كهربائية تتضمن القطع والوصل .

يجدر بنا ان نقف عند فكرة هامة ، فطلى الرغم من انه يبدو مريحا ان نعتبر الارقام الثنائية المستخدمة بهذا الشكل اعدادا ثنائية بالمعنى الرياضي ، فان هذا المعنى ليس له اي أهمية البتة في عملنا ، اذ ان بمقدورنا اختيار أي عدد ثنائي لتمثيل عدد عشري معلوم .

ان استخدامنا لعشرة من الاعداد الثنائية المكون كل منها من اربعة ارقام ثنائية يعني هدونا للاعداد الستة الاخرى . نستطيع ان نرسل هذه الاعداد وفق نفس تكتيك القطع والوصل ، الا اننا لا نفعل ذلك ابدا . يمكننا نحاشي مثل هذا الهدر بترميز سلاسل مؤلفة من ٢ ، ٣ ، او اكثر من الارقام العشرية او الاحرف الاخرى بواسطة الارقام الثنائية . فمثلا يمكننا تمثيل كل السلاسل المكونة من ثلاثة ارقام عشرية باستخدام عشرة ارقام ثنائية ، بينما يقتضي الامر ١٠٢ رقم ثنائي لتمثيل المنفصل لكل من الارقام العشرية الثلاثة .

ان ورود اي سلسلة من الارقام العشرية هو امر ممكن ، الا ان سلاسل الاحرف لا ترد جميعها ، اذ لا يرد من سلاسل الاحرف الا الكلمات المستخدمة في اللغة المعتبرة . ويبدو استنادا لهذه الحقيقة ان ترميز الكلمات باستخدام الارقام الثنائية سيكون أكثر كفاءة من ترميز الاحرف الالجدية تمز هذه النتيجة صحة الفكرة القائلة ان ترميز السلاسل أكثر اقتصادية من ترميز عناصرها بشكل منفصل .

يقودنا كل ذلك الى الحدس بان هناك طريقة مثلى لترميز الرسائل التي يولدها مصدر رسائل ، وتعرف هذه الطريقة بكونها تحتاج الى اصغر كمية ممكنة من الارقام الثنائية .



الفصل الخامس

للترميز

استعرضنا في الفصل السابق طرقاً مختلفة لترميز الرسائل ،وتتضمن كل أنواع الاتصالات ، في الواقع ، ضرباً من الترميز . ففي الحالة الكهربائية ، يمكن ترميز الاحرف باستخدام نقاط وخطوط التيار الكهربائي أو شدة مختلفة للتيار واتجاهات عديدة لتدفقه كما في مبرقة اديسون الرباعية . كذلك يمكننا ترميز الرسالة باستخدام الارقام الثنائية : ١ ، ٠ وبشها كهربائياً كسلسلة من النبضات والفواصل .

لقد بينا بالفعل أن اخذ العيّنات بشكل دوري من إشارة مستمرة كموجة التخاطب مثلاً ، وأن تمثيل شدة العيّنات بشكل تقريبي عن طريق انتقاء أقرب قيمة من مجموعة من الأعداد المنفصلة ، كل ذلك سيمكننا من تمثيل أو ترميز حتى الاشارات المستمرة باستخدام الارقام الثنائية .

أوضحنا أن عدد الارقام التي يحتاجها الترميز يتوقف على طريقة الترميز . وهكذا يلزمنا عدد أقل من الارقام الثنائية إذا رمزنا زمر من الاحرف عوضاً عن ترميز كل حرف على حدة . ونظراً لأن عدد تراكيب الاحرف المعتمدة في اللغة قليل جداً بالمقارنة مع كل تراكيب الاحرف ، فإن الامر المهم هنا هو أن ترميز الكلمات في نص معين سيستهلك عدداً من الارقام الثنائية أقل بكثير مما لو رمزنا احرف النص كلم على حدة .

نؤكد ان هناك طرقا عديدة لترميز الرسائل المتولدة من مصدر مستقر ، كمصدر للنصوص اللغوية مثلا . ماذا ستكون الحاجة الفعلية من الارقام الثنائية لكل حرف أو كلمة ؟ هل سيتحتم علينا تجريب كل اشكال الترميز الممكنة لنقرر أيها الامثل . ولكن اذا جربنا كل الاشكال الممكنة وانتقينا الامثل ، فسنبقى في شك من امرنا ، اذ قد يكون شكل الترميز الامثل ذاك الذي لم يخطر على بالنا وبالتالي لم نجربه .

الا توجد طريقة احصائية ، على الأقل من حيث المبدأ ، تمكننا من اجراء معايرات احصائية على الرسائل المتولدة من مصدر معين ، مثل تلك المعايرت ستلفت نظرنا الى قيمة صغرى وسطية لعدد الارقام الثنائية المقابلة لكل إشارة ، ويمكن استخدام هذه القيمة في ترميز الرسائل .

نعود الى نموذج المصدر المرسل الذي عرضناه في الفصل الثالث واعتبرنا انه مصدر مستقر للرموز كالاحرف أو الكلمات . يتسم المصدر بخصائص احصائية ثابتة مثل : التواتر النسبي للرموز ، احتمال أن يلي رمز معين رمزا آخر معلوم أو زوجا من رمزين محددين ، أو تركيبا من ثلاثة رموز وغير ذلك .

نتحدث في حالة النصوص اللغوية من التواترات النسبية للكلمات وعن احتمال أن تلي كلمة معينة كلمة أخرى معلومة ، أو زوجا من الكلمات ، أو تركيبا ثلاثيا منها ، وكذلك التركيب الأعلى ..

لقد عملنا بهدف توضيح الخصائص الاحصائية لسلاسل الاحرف أو الكلمات لشرح كيفية انشاء التركيب تشبه النصوص اللغوية الطبيعية وذلك باجراء سلسلة من الخيارات العشوائية بين الاحرف والكلمات ، بشرط أن يؤخذ بعين الاعتبار الاحتمالات الخاصة بتلك الاحرف والكلمات ، أو احتمالات سبقها لسلاسل أخرى من الاحرف والكلمات . لقد انجزنا الخيارات العشوائية في هذه الامثلة برمي حجر الترد أو السحب العشوائي لبطاقة من جعبة أو غير ذلك من العمليات الاحتمالية .

نملرس خيلراً مشابهاً اثناء الكتابة أو القراءة : ماذا سنقول بعد أو ماذا ستكون جملتنا التالية . لا نجد في بعض الأحيان أي خيار ففي اللغة الإنكليزية مثلاً إذا كتبنا الحرف Q فعلينا بشكل ملزم أن نكتب بعده الحرف U . وبصورة عامة يكون لدينا خيار أكبر لدى محاولتنا كتابة الحرف الثاني من كلمة بالمقارنة مع الخيار المتبقي لدى بلوغنا منتصف الكلمة . يبرز الخيار ، على الرغم من ذلك ، ويمارس بشكل مستمر في كل مصدر للرسائل سواء كان حياً أو ميكانيكياً . ولولا ذلك لكافت كل الرسائل المصدرة مقردة سلفاً بشكل كامل وقابلة للتنبؤ الدقيق .

يقابل الخيار الذي يملسه مصدر الرسائل لدى توليده رسالة معينة ، درجة من الرية لدى المستقبل يمكن حلها لدى تفحص الرسالة. أن هدف الاتصال ونتيجته الأولى تكمن في حل هذه الرية أو الدرجة من الرية .

إذا لم ينطو مصدر الرسائل على أي خيار ، أي إذا لم يكن على سبيل المثال بمقدوره أن ينتج إلا سلاسل لا نهاية لها من عنصر مكرر هو الواحد ، أو سلاسل لا نهاية لها من عنصر مكرر هو الصفر ، كان المستقبل بالقابل في حل من أي التزام تجاه تفسير الرسالة وتفحصها لمعرفة محتواها ، إذ بإمكانه في هذه الحالة وبسلطة التنبؤ بها بشكل دقيق وكامل . وهكذا إذا كنا نرغب بقياس المعلومات بطريقة عقلية ، كان علينا تبني المعيار الذي يزيد بزيادة الخيارات المطروحة أمام المصدر، أي المعيار الذي يزيد بزيادة رية المستقبل إزاء ما سيقوم المصدر بتوليده وبشبه .

إن لكل مصدر بالطبع ، كمية من الرسائل الطويلة أكثر مما له من الرسائل القصيرة . فمثلاً هناك رسالتان ممكنتان تتألف كل واحدة منهما من رقم ثنائي وأحد ، و٤ تتألف كل منها من رقمين ثنائيين ، و١٦ في كل منها ٤ أرقام ثنائية ، و٢٥٦ رسالة في كل رسالة ٨ أرقام ثنائية

وهكذا . هل من الواجب علينا أن نقول أن كمية المعلومات أننا بقيسها عدد هذه الرسائل ؟ لننتصور أربعة خطوط برقية تستخدم بشكل آني لنقل الأرقام الثنائية وبنفس السرعة ، طبعاً نستطيع باستخدام هذه الخطوط إرسال كمية من الأرقام تساوي أربعة أضعاف ما يمكننا إرساله في حالة خط واحد . إذا كان الأمر كذلك ، إذن لوجب علينا قياس كمية المعلومات بدلالة عدد الأرقام الثنائية عوضاً عن عدد التراكيب المختلفة التي يمكن للأرقام الثنائية تشكيلها، وهذا يعني بالتالي أن كمية المعلومات يجب ألا تقاس بعدد الرسائل الممكنة ، بل بلوغريتم هذا العدد .

إن قياس كمية المعلومات كما طرحه نظرية الاتصالات يؤمن ذلك ، وهو أمر منطقي إذا نظر إليه من جوانب أخرى أيضاً . يدمى مقياس كمية المعلومات بالانتروبي . إذا رغبتنا بفهم الانتروبي كما طرحها نظرية الاتصالات فعلياً تناسي الانتروبي التي تقدمها الفيزياء . وعندما نتفهم الانتروبي الخاصة بنظرية الاتصالات ، فلن يكون هناك أي ضرر إذا حاولنا ربطها بالانتروبي الفيزيائية ، وإن كانت أدبيات الفيزياء تؤكد أن المفاهيم الذين حاولوا ذلك لم يستطيعوا الخروج من الفوضى التي خلقها خلط الأفكار بين انتروبي الفيزياء وانتروبي الاتصالات .

تقاس انتروبي الفيزياء بوحدة البيت Bit . وهكذا نتحدث من انتروبي مصدر رسائل معين على أنه مساوٍ لكل بيت لكل حرف ، أو لكل كلمة ، أو لكل رسالة . إذاً قلّت سرعة توليد المصدر للرموز ثلجته، أمكننا القول أن هذا المصدر يملك انتروبي تساوي لكل بيت في الثانية .

تزداد الانتروبي بالزيادة عدد الرسائل التي يمكن للمصدر إجراء الخيار بينها ، وهي تزداد أيضاً بالزيادة حرية الخيار (أو بالزيادة رتبة المستقبل) وتتناقص بالزيادة الحدود المفروضة على حرية الخيار والريبة . فمثلاً حصر بعض الرسائل سواء بالإقلال من إرسالها أو تكرارها كثيراً سينقص حرية الخيار لدى المصدر. وكلما الريبة لدى المستقبل ، والنتيجة هي انخفاض الانتروبي .

لا شك سيكون أمراً متميزاً أن نوضح الانثروبي أولاً بمثال . تعامل نظرية الاتصالات الرياضية مصدر الرسائل على أنه مصدر مستقر حيث يتم إنتاج سلاسل من الإشارات هي إلى حد ما غير قابلة للتنبؤ . يجب أن نتخيل المصدر وهو ينتقي إحدى الرسائل بوسائط غير قابلة للتنبؤ أي عشوائية ، ولعل أبسط شكل للتنبؤ ذاك الذي يفترض وجود رمزين فقط س ، ص يقوم المصدر وبشكل متكرر بلجراء الخيار بينهما وبشكل مستقل أي أن الخيار الحالي غير مرتبط بالخيارات السابقة . لا نعلم في هذه الحالة إلا أن الرمز س يمكن أن يختار باحتمال ح ، ، وص يمكن أن يختار باحتمال ح₁ ، تلمنا كما في حالة قذف قطعة نقد معدنية . يمكن للمستقبل أن يكتشف هذه الاحتمالات بتفحص سلاسل طويلة يولدها المصدر مكونة من هذين الرمزين س ، ص . يجب أن تبقى القيمتان ح ، ح₁ ثابتتين مع الوقت إذا كان المصدر مستقراً .

تساوي الانثروبي في هذه الحالة البسيطة :

$$T = - (ح. ل. ح. + ح_1 ل. ح_1) \text{ بيت لكل رمز}$$

وهكذا تساوي الانثروبي العاكس بالإشارة لمجموع حدين هما : احتمال اختيار الرمز س مضروباً بلوغاريتمه واحتمال اختيار الرمز ص مضروباً بلوغاريتمه .

إن السبب الحقيقي لتصريف الانثروبي على هذا النحو للحالة البسيطة وفي الحالات الأعمد أن يتضح مهما حاولنا بناء حجج مقولة ، وواقع الأمر أن الوضوح المنشود لن يتحقق إلا من خلال تقديمنا المطرد في البحث ، لذا فإن تبرير العلاقة الأخيرة سيؤجل إلى مرحلة لاحقة . نستذكر أن اللوغاريتم يؤخذ بالنسبة لأسس مختلفة ، والأساس المعتبر للوغاريتم في نظرية المعلومات هو الأساس ٢ . يوضح الجدول التالي بعض خواص اللوغاريتم .

العدد	طريقة ثانية في كتابته	طريقة ثالثة في كتابته	لوفاريتمه
$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0.415
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1.415
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	2
$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	3
$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	4
$\frac{1}{32}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	6
$\frac{1}{64}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	8
$\frac{1}{128}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	10

يمرّف لوفاريتم العدد من الأساس 2 على أنه القوة التي إذا رفع عليها العدد 2 حصلنا على العدد المعتبر.

لنتخيل مصدراً للرسائل ينطوي على قذف قطعة نقد معدنية .
ولكن من ممثلة (الطرة) و من ممثلة (للنقش) . عندها يتساوى
الاحتمالان ح. ح. ويكون : ح. = 1/2 أي أن احتمال الطرة مثل
احتمال النقش ويسلوي كل من الاحتمالين 1/2 .

تساوي الانتروبي في هذه الحالة ووفق علاقتنا السابقة :

$$ت = - (\frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2})$$

$$= - (\frac{1}{2} \log 2 + \frac{1}{2} \log 2)$$

$$= - (\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) = -1 \text{ بيت لكل رمية لقطعة النقد :}$$

إذا ولد مصدر الإرسال سلسلة مكونة من (الطرة) و (النقش) ناجمة من رمي قطعة النقد فإن الأمر يستلزم بيت واحدة من المعلومات لنقل رسالة تفيد من ظهور الطرة أو النقش .

لنلاحظ الآن أننا نستطيع تمثيل خرج (رميات متتالية لقطعة النقد بواسطة أرقام ثنائية تساوي في عددها عدد الرميات الواقعة ، ونختار لتمثيل الطرة و . لتمثيل النقش . وهكذا وفي هذه الحالة على الأقل ، يتساوى الرقم الدال على الانتروبي : ١ بيت لكل رمية مع الرقم الدال على الأرقام الثنائية اللازمة لتمثيل الخرج في كل رمية وهو ١ رقم ثنائي للرمية ، أي يتساوى في هذه الحالة عدد الأرقام الثنائية الضرورية لنقل الرسائل التي يولدها المصدر (تتالي الطرة والنقش) مع انتروبي المصدر. نفرض الآن أن المصدر يولد سلسلة مكونة من . و ١ باستخدام قطعة نقد خاصة تظهر النقش في $\frac{1}{2}$ الحالات والطره في $\frac{1}{2}$ الحالات . يكون لدينا في هذه الحالة :

$$١ح = \frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2} = -1$$

$$ت = - (\frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2})$$

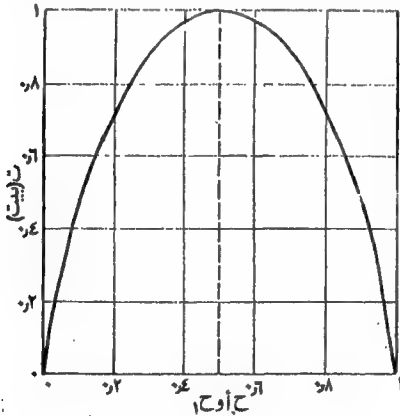
$$= - (\frac{1}{2} \log 2 + \frac{1}{2} \log 2)$$

$$= -1 \text{ بيت لكل رمية}$$

نشعر أنه باستخدامنا قطعة النقد الخاصة هذه تزداد معرفتنا بالخرج بالمقارنة مع قطعة النقد السابقة . وأكثر من ذلك ، فتقليدنا بالحصول على النقش بأكثر من حصولنا على الطرة يقلل من الخيارات الممكنة التي توفرت عندما كان احتمال حصولنا على الطرة مساوياً لاحتمال حصولنا على النقش . يبدو أن هذا صحيح فعلاً لأنه إذا ارتفع احتمال النقش إلى ١ وانخفض احتمال الطرة إلى صفر ، انضمت الخيارات ألعنا بشكل كامل . وكما رأينا في حالة قطعة النقد الخاصة

فإن الانتروبي تساوي ٨.١١ د. بيت لكل رمية . نتصور عند هذه المرحلة انه يجب ان تتوفر لدينا القدرة على تمثيل الخرج الخامس برميات قطعة النقد الخاصة المفترضة بحد أقل من الأرقام الثنائية لكل رمية إلا انه ليس واضحاً كم يلزمنا من الأرقام الثنائية .

إذا كان احتمال ورود النقش ح ، كان احتمال ورود العرة ح. ١ - ح وهكذا تتوقف معرفتنا لأحد الاحتمالين على معرفتنا للاحتمال الآخر . يمكننا استناداً الى ذلك حساب قيم متعددة لـ ت مقابلة لقيم مختلفة لـ ح. ومن ثم توقع منحني بيانياً يربط بين ح ، ت . يوضح الشكل ٥ - ١ هذا المنحني حيث تصل ت الى قيمتها العظمى من أجل ح = ١/٢ ، بينما تصبح ت مساوية للصفر من أجل قيمتين لـ ح هما : ١ ، ٠ . أي عندما يقتصر الإصدار على أحد الرمزين دون الآخر .



الشكل ٥ - ١

لا يهم اذا اعتبرنا ان الرمز س هو الطرة وص هو النقش او العكس
لذا يكون المنحني الممثل لارتباطات مع ح هو نفسه الممثل لارتباطات
مع ج، وهذا ما يؤيده تناظر المنحني في الشكل ٥ - ١ بالنسبة للخط
الشاغولي المنقط .

يمكن لمصدر الارسال ان ينتج خيارات متتالية من بين الاقسام
المشترية العشرة ، او من بين الاحرف الابدجية ، او من بين آلاف الكلمات
من قاموس لغة معينة . نعتبر حالة توليد المصدر لرمز او كلمة من
بين عدد من الرموز او الكلمات مساو لـ ن ، وباحتمالات مستقلة من
الخيارات السابقة .

$$ت = \frac{ن}{م} = \frac{ح}{م} \text{ لـ } ح \text{ بيت لكل رمز}$$

يعني الرمز $\frac{ن}{م}$ هنا اجراء عملية الجمع لكل الحدود الناجمة من
اعتبار كل قيم الحصول على الرمز الذي ترتيبه م . اذا فرضنا $ن = ٢$
فاننا نمود ببساطة الى الحالة المعتبرة سابقا .

نغرب مثالا بهدف الايضاح . نفرض اننا نرمي قطعتي نقد في وقت
واحد ، والذاك نحصل على اربع امكانات مختلفة للخروج نميزها بالاعداد
١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ وفق ما يلي .

١	طررة	طررة
٢	نقش	طررة
٣	طررة	نقش
٤	نقش	نقش

وبذا يكون احتمال كل شكل من اشكال الخرج مساويا $\frac{1}{4}$ ، وبالتالي
تساوي الانتروبي في هذه الحالة :

$$ت = - \left(\frac{1}{4} \log \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} \right)$$

$= - (-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}) = 2$ بيت لكل رمية مزدوجة يحتاج
 الامر كمية من المعلومات تساوي 2 بيت لتوصيف او نقل خرج عملية
 رمي قطعتي نقد في وقت واحد . وكما في حالة رمي قطعة نقد واحدة
 يتساوى فيها احتمال ورود الطرة مع احتمال ورود النقش ، نستطيع في
 حالتنا الجديدة هذه استخدام رقمين ثنائيين لتوصيف خرج رمي القطعتين
 اذ نربط رقم ثنائي بكل قطعة على حدة . يفضي كل هذا الى امكانية
 بث الرسالة المولدة في حالتنا هذه (رمي قطعتي النقد) باستخدام عدد
 من الارقام الثنائية مساوٍ للانثروبي .

اذا توفر لدينا مجموعة من الرموز عددها n متكافئة في احتمال
 ظهورها ، كان ذلك الاحتمال مساوياً $\frac{1}{n}$. يكون لدينا في هذه الحالة

عدد من الحدود يساوي n ، حيث يساوي كل حد بدوره الى $\frac{1}{n}$ لع $\frac{1}{n}$

$$T = - \text{لع} \frac{1}{n} = \text{لع} n \text{ بيت لكل رمز}$$

مثلاً عندما نرمي حجر النرد ، يتساوى احتمال ظهور أي من وجوهه
 مع احتمال ظهور أي وجه آخر ، وهذا الاحتمال هو $\frac{1}{6}$ ، وتكون الانثروبي
 في هذه الحالة $-\text{لع} \frac{1}{6} = 2.58$ بيت لكل رمية .

وبصورة عامة نفترض اننا اخترنا في كل مرة وباحتمالات متساوية
 عدداً ثنائياً من مجموعة اعداد ثنائية يتكون كل منها من h رقم ثنائي .
 ولما كان هناك 2^h من هذه الاعداد ، نحصل على :

$$n = 2^h \quad \text{لع} \frac{1}{n} = \text{لع} \frac{1}{2^h} = -\text{لع} 2^{-h} = -h$$

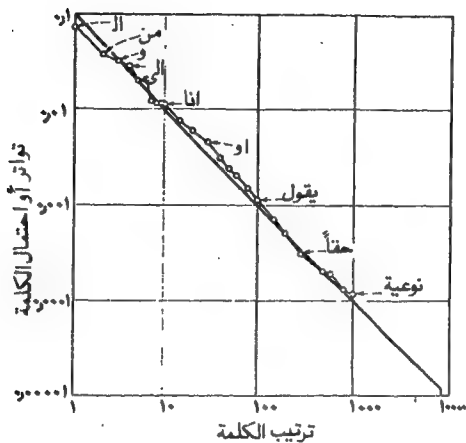
وهكذا فمن أجل مصدر يولد عند كل خيار وبنفس الاحتمال عددا ثنائيا مكونا من (هـ) رقم ثنائي ، تكون الانتروبي مساوية لـ هـ بيت لكل عدد . ان الرسالة التي يولدها المصدر هنا عبارة عن عدد ثنائي يمكن تمثيله بالطبع بأرقام ثنائية ، وايضا تمثل هذه الرسالة بعدد من الارقام الثنائية يساوي لانتروبي الرسالة مقاسة بالبيت . يوضح هذا المثال كيف ان على اللوغاريتم ان يكون التابع الرياضي ذي الدور الرئيسي في تعريف الانتروبي .

تختلف في الحالة العادية ، احتمالات توليد المصدر للاشارات باختلاف الاشارة المولدة . نأخذ كمثال مصدرا مرسلا يولد الكلمات من اللغة الانكليزية بحيث يستقل ورود كل كلمة جديدة عما قبلها ولكن بالأخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورود الاحرف في النصوص الانكليزية وهو ما اشرنا اليه على انه التقريب الاول في الفصل الثالث .

اذا ربنا كلمات الانكليزية وفق تواتر ورودها الشائع ، تقع الكلمات الاكثر تواترا في المقام الاول اي تعطى الرقم ١ مثل كلمات (the, in fact) بينما الكلمات التالية في التواتر تعطى الرقم ٢ مثل كلمة of ، وهكذا فاحتمال الكلمة ذات الترتيب ر (اذا لم تكن ر كبيرة جدا) هو :

$$\frac{1}{r} = p_r$$

يوضح الشكل ٥ - ٢ المخطط البياني لهذه العلاقة النظرية ممثلا بالخط الاسود الممتد من اعلى اليسار الى اسفل يمين الشكل ، كما يوضح التقارب الشديد بين هذا الخط النظري والنقاط الواقعة بشكل تجريبي ، وتعرف هذه العلاقة باسم علاقة زيف وستعرض لها في الفصل السابع ، بينما سنكتفي هنا باستخدامها .



الشكل ٢ - ٥

نستطيع أن نبرهن على أن هذه العلاقة ليست صحيحة بالنسبة لكل الكلمات ، ويتضح ذلك إذا اعتبرنا رمي قطعة النقد المعدنية إذا تساوى احتمال ظهور الطرة والنقش وكان كل منهما مساوياً $\frac{1}{2}$ ، فإن يكون هناك خرج ممكن آخر لأن $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$. أما إذا كان احتمال أن تطفئ قطعة النقد على حافتها غير مساوي للصفر ، كان يساوي $\frac{1}{2}$

مثلاً ، فنتوقع عندها أنه في حالة ١٠٠ رمية يمكن أن تظهر الطرة في ٥٠ من الحالات وأن يظهر النقش في ٥٠ حالة أخرى ، وأن تقف القطعة على حافتها في عشرة حالات . يظهر هذا وكأنه مضحك ، إذ يجب أن يكون مجموع كل الاحتمالات مساوياً الواحد . لنلاحظ أنه إذا أضفنا الاحتمالات التي تعطيها العلاقة السابقة : ح ١ ثم ح ٢ ثم
 ح
 فسنجد أن المجموع سيصبح مساوياً الواحد عند إضافة ٨٧٢٧ .
 إذا قبلنا هذه الحقيقة كما هي ، فنصل إلى نتيجة مفادها أنه لا يمكننا أن نستخدم أي كلمة بعد ذلك . واقع الأمر أن العلاقة الأخيرة تقريبية إلى حد ما .

ومهما يكن من أمر فالخطأ المركب ليس كبيراً ، وقد استخدم شانون هذه العلاقة في حساب الانتروبي الخاصة بمصدر رسائل يولد الكلمات بشكل مستقل ولكن بالأخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورودها في النصوص الانكليزية ، ولكي يحافظ على القيمة النظرية لمجموع الاحتمالات وهي ١ ، فقد اعتبر الكلمات الـ ٨٧٢٧ الأكثر شيوعاً في اللغة الانكليزية وحسب الانتروبي استناداً لذلك فوجدها مساوية لـ ٩١٤ بيت لكل كلمة .

وجدنا في الفصل الرابع أنه يمكن ترميز النصوص الإنكليزية حرفاً بحرف باستخدام ٥ ارقام ثنائية لكل حرف أو ٢٧٥ رقم ثنائي لكل كلمة ، كما استعرضنا كيفية استخدام السلاسل المختلفة من الأرقام الثنائية لترميز ١٦٣٥٧ كلمة و ٢٦ حرف وفراغ واحد ، وأن توظيف ١٤ رقم ثنائي لكل كلمة يفرض ترميز النصوص الإنكليزية . يصل بنا ذلك إلى حالة من التشكيك فيما إذا كانت الانتروبي تعطي فعلاً عدد الأرقام الثنائية اللازمة ، إذ كما أسلفنا ، يشير حساب شانون المستند إلى الاحتمالات النسبية لكلمات اللغة الإنكليزية إلى أن ٩١٤ رقم ثنائي لكل كلمة يكفي فعلاً .

أما خطواتنا التالية في طريق اكتشاف عدد الأرقام الثنائية اللازمة لترميز رسالة يولدها مصدر مرسل فتتضمن عرض نظرية مدهشة برهناها شانون تتعلق بالمصادر المستقرة حيث تجري عمليات مستقلة وفق احتمالات معينة للأحرف أو الكلمات .

نعتبر كل الرسائل التي يمكن للمصدر أن يولدها والتي تتألف من عناصر معينة تضم عدداً كبيراً من الأحرف . مثلاً الرسائل التي تتكون كل منها من ١٠٠٠٠ رموز (أحرف ، كلمات ، ... الخ) ، وبصورة أهم الرسائل المكونة من n حرف . إن بعض هذه الرسائل محتمل أكثر من الرسائل الأخرى . يرد الرمز الأول في الرسائل المحتملة : x_1 ، x_2 ، بينما يرد الرمز الثاني x_2 ، وهكذا . إذن يرد كل رمز في الرسائل المحتملة وفق التواتر المميز للمصدر . وعلى الرغم من ذلك فيمكن للمصدر توليد أنواع أخرى من الرسائل ، كان يصدر رسالة مكونة من رمز واحد مكرر بشكل لا نهائي ، أو ان يصدر الرموز بغير تواترات ورودها المشار إليها ، إلا أن هذا المصدر قلما يفعل ذلك .

ان الحقيقة الهامة هي انه إذا كانت T هي انتروبي المصدر ،

ت ن
فسيكون هناك بالضبط حوالي ٢ رسالة محتملة ، اما الرسائل المتبقية الأخرى فسيكون احتمال ورودها صغيراً بدرجة يمكن اهماله . وبعبارة أوضح ، اذا صنفنا الرسائل من أكثرها احتمالاً إلى أدناها احتمالاً ،

ت ن
وربطنا بالرسائل الأكثر احتمالاً التي عددها ٢ أعداداً ثنائية عددها T ، فسنكون على يقين من أن كل رسالة مكونة من n رمز سيولدها المصدر بشكل فعلي لا شك سيقابلها عدد معين .

لجأ لتوضيح هذه الأفكار إلى حالات خاصة بسيطة . نفرض أن الرموز المنتجة هي . ١ ، ٢ . إذا تساوى احتمال هذين الرمزين وكان كل منهما مساوياً $\frac{1}{2}$ ، كانت الانتروبي كما رأينا مساوية لـ ١ بيت لكل رمز . نفرض أن المصدر يولد رسائل يساوي طولها ١٠٠٠ رقم ٢ فيكون

١٠٠٠

الجداء $T = ١٠٠٠$ ووفق نظرية شانون يجب أن يكون هناك ٢ رسالة محتملة .

١٠٠٠
 ان استخدام ١٠٠٠ رقم ثنائي يمكننا من كتابة ٢ عدد ثنائي .
 وهكذا فلتحديد رقم ثنائي مختلف لكل رسالة محتملة علينا استخدام
 أعداد ثنائية يتكون كل منها من ١٠٠٠ رقم ثنائي . وهذا ما توقعناه
 بالضبط . فلكي نحدد للمستقبل أي الأعداد الثنائية المكونة من ١٠٠٠
 رقم ثنائي يقوم المصدر بتوليدها ، علينا بث رسالة مكونة من ١٠٠٠
 رقم ثنائي .

نفرض ان الأرقام المكونة للرسائل التي يولدها مصدر الرسائل يتم
 اختيارها إر رمي قطعة نقد احتمال الطرة فيها $\frac{1}{2}$ واحتمال لنقش $\frac{1}{2}$ ،
 وهكذا فالرسائل النموذجية المتولدة عن هذا المصدر تحوي من ال ١ أكثر
 مما تحوي من ال ٠ ، إلا أن هذا ليس كل ما في الأمر . رأينا أن الانتروبي
 في هذه الحالة هي ٨.١١ - بيت لكل رمية ، وإذا اعتبرنا ن مرة أخرى
 مساوية لـ ١٠٠٠ ، أي ان طول كل رسالة هو ١٠٠٠ رقم ثنائي ، فيكون
 الجداء ن مساوياً لـ ٨١.١ ، وبينما كان عدد الرسائل الممكنة سابقاً هو
 ١٠٠٠
 ٨١.١ أصبح في هذه الحالة ٢ فقط .

٨.١١
 ان استخدام ٨.١١ رقم ثنائي يمكننا من كتابة ٢ عدد ثنائي حيث
 نستطيع ربط كل واحد من هذه الأعداد لكل رسالة ممكنة قوامها ١٠٠٠
 رقم ثنائي تاركين الرسائل الغير ممكنة والتي عددها ١٠٠ دون ترميم .
 وهكذا يمكننا ان نرسل الى المستقبل ما يدل على الرسالة ذات الطول
 ١٠٠٠ رقم التي يولدها المصدر بيت ٨.١١ رقم ثنائي فقط . ويبقى احتمال
 أن يولد المصدر إحدى الرسائل غير المحتملة مهملاً بدرجة كافية .
 لا نستطيع تقديم ضمانات مطلقة فيما يخص معالجتنا حتى الآن ، فمصدر
 ٨.١١
 الرسائل قد يولد رسالة غير مقرونة بعدد من بين أعدادنا ال ٢ المكونة
 من ٨.١١ رقم ثنائي . لا نستطيع في هذه الحالة بث الرسالة ، على الأقل
 باستخدام ٨.١١ رقم ثنائي .

نصادف مرة أخرى ما يؤكد لنا أن عدد الأرقام الثنائية اللازمة لبث رسالة ما يساوي حاصل ضرب الإنتروبي مقدرة بالبيت لكل رمز في عدد الرموز . يجدر بنا أن نذكر أننا حققنا في ايضاحنا الأخير بثاً اقتصادياً بترميز التراكيب ، أي باعتبار رسالة من ألف رقم وأكثر ومن ثم ترميزها برمز خاص ، وكذلك ترميز الرسائل المماثلة باستخدام ٨/١١ رقم ثنائي .

ما مدى صحة هذا الافتراض ؟

لقد عالجتنا حتى الآن الحالات التي يولد فيها مصدر الإرسال الرموز المختلفة (أعداد ، أحرف ، كلمات) بشكل مستقل عن الرموز التي ولدها في مرحلة سابقة . أن هذا الأسلوب لا يتفق وطريقة إنشاء النصوص اللغوية ، فإلى جانب القيود الإحصائية على تواتر الكلمات ، هناك قيود أخرى على ترتيب الكلمات ، لذا سيكون الخيار أمام الكاتب عند كتابته كلمة جديدة أقل مما لو كانت الفرصة متاحة أمامه لانتقاء هذه الكلمة بشكل مستقل عما سبقها .

كيف يمكن أن نمالج مثل هذه الحالة . نجد مفتاح الحل في طريقة ترميز التراكيب التي شرحناها في الفصل الرابع والتي استعملناها مرة ثانية في المثال الأخير . إذا كان المصدر مستقراً فيعتمد الحرف التالي على واحد أو أكثر من الأحرف الخمسة السابقة وليس على الأحرف التي تسبق هذه المجموعة . يوضح التقريبان الثاني والثالث المقدمان في الفصل الثالث كيفية توليد نص وفق هذه الطريقة . إذا اعتبرنا عملية مستقرة ما أي عملية المسؤول الأول فيها هو مصدر مستقر ، وكانت تلك العملية من النوع القابل للنمذجة الرياضية ، لوجب أن يكون تأثير الماضي على الرموز الجديدة المتولدة متناقصاً كلما كان ذلك الماضي أبعد . ينطبق ذلك على توليد النصوص اللغوية ، وعلى الرغم من أنه يمكننا تصور حدوث العكس (كان نستخدم نفس الاسم لشخصيات رواية ما) ، فإن الكلمات التي اكتبها الآن تعتمد على ما كتبته سابقاً قبل عشرة آلاف كلمة من موقع الكلمة المعنية .

نفرض الآن اننا نجزيء الرسالة قبل ترميزها الى تراكيب طويلة من الرموز . اذا كانت هذه التراكيب طويلة بما فيه الكفاية فسيقتصر تأثير الرموز من تركيب سابق على الرموز الاولى فقط من التركيب التالي ، واذا زدنا في طول التراكيب كثيراً ، فان عدد الرموز المتأثرة تلك سيكون مهملاً بالمقارنة مع عدد الرموز في كل تركيب . يؤهلنا ذلك لحساب انتروبي كل تركيب ولتحقيق هذا الحساب نفرض احتمال التركيب ذي الترتيب m هو : $C(b, m)$ ، و ستكون الانتروبي معطلة بالعلاقة :

$$H = - \sum_{m=1}^b C(b, m) \log C(b, m) \quad \text{بيت لكل تركيب}$$

سيمترض اي رياضي على تسمية هذه الكمية بالانتروبي ، وبدلاً من ذلك سيقول انها ستقترب من الانتروبي بلقديان طول التراكيب ، أي بتضمينها أعداداً أكبر من الرموز . لذا علينا ان نفترض اننا سنزيد من طول التراكيب لنقترب أكثر وأكثر من القيمة الحقيقية للانتروبي . وفي اطار هذا الشرط نستطيع ان نحسب الانتروبي لكل رمز ، بان تقسم انتروبي على عدد الرموز الواردة في التراكيب n ، أي :

$$H(n) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^b C(b, m) \log C(b, m) \quad \text{بيت لكل رمز}$$

تؤدي حسابات الانتروبي في غالبية الاحيان الى قيم عالية اذا لم نأخذ بعين الاعتبار العلاقات بين الرموز وهكذا اذا زدنا n في العلاقة الاخيرة بشكل مطرد اقتربنا باستمرار من القيمة الحقيقية للانتروبي .

لقد قررنا منذ البداية ان تعريف كمية المعلومات يجب ان يتسقى مع فكرة بث عدة رسائل منفصلة عبر أسلاك مختلفة بحيث تساوي الكمية الاجمالية للمعلومات المرسله مجموع الكميات المرسله عبر كل سلك على حدة . وهكذا فالحصول على الانتروبي بجملة مصادر مستقلة عملة في نفس الوقت ما علينا الا جمع الانتروبي لكل مصدر . نذهب

ابعد من ذلك ونفترض ان المصدر يعمل بشكل متقطع عندها يجب ان نضرب سرعة ائبثاق المعلومات عنه او الانتروبي الخاصة به بالنسبة المثوية لوقت عمله وذلك بنية الحصول على قيمة وسطية لسرعة اصناره للمعلومات .

نفرض جدلاً انه لدى ارسالتنا سلسلة من الاحرف التكيزية مثل TH كان لدينا مصدر ارسال وحيد . يكون احتمال ورود الحرف \bar{H} في الاصدار التالي عالياً جداً في هذه الحالة . وقد أصبح لدينا مصدر ارسال آخر عند بشنا لزوج الاحرف NQ . يكون احتمال ورود الحرف U . في هذه الحالة مساوياً الواحد . لنحسب الانتروبي لكل من هذين المصدرين . نشير الى انتروبي كل مصدر بالرمز \bar{P} ، ثم نضرب هذه

الانتروبي بالمعدد ح (ب) الدال على احتمال عمل ذلك المصدر (اي \bar{P})

بنسبة الفترة التي يعمل ذلك المصدر خلالها) ثم نجمع كل الارقام الناتجة لنحصل على متوسط الانتروبي او اجمالي سرعة المصدر الذي هو عبارة عن اتحاد عدة مصادر يعمل كل منها لفترة زمنية محددة . نعتبر كمثال مصدراً ينطوي على احتمالات ازواج فقط ، اي ان مجمل تأثير الماضي ينحصر في الحرف الاخير الصادر فلكل حرف تواتر وروده كالحرف E يتواتر ١٣ ٪ ، وكالحرف W تواتر وروده ٢ ٪ .

نصيغ كل ما تقدم في لغة رياضية متماسكة فنفرض ان تركيباً معيناً مكوناً من ن رمز قد تم توليده من قبل المصدر ، فاذا رمزنا لهذا التركيب بالرمز \bar{P} فنصطح على احتمال ان يكون الرمز التالي هو س بالرمز \bar{P}

ح (س)
 \bar{P}

يعتبر هذا المصدر ماملاً فقط عندما يصدر تركيب ما عنه ، تساوي
الانثروبي الخاصة به في هذه الحالة :

$$- \quad \begin{matrix} \text{ح} & \text{ل} & \text{ح} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{ل} & \text{ح} & \text{ل} & \text{ح} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{ل} & \text{ح} & \text{ل} & \text{ح} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix}$$

حيث اعتبرنا هنا صدور التركيب ب المكون من ن رمز وتم اجراء الجمع
لكل الرموز بدءاً من ل = ١ وحتى ل = ن .

ولكن ماهي نسبة الفترات التي يعمل خلالها هذا المصدر . تعتبر
بالنسبة لهذا المصدر فترة عمل تلك الفترة التي يصدر خلالها تركيب
مكون من ن رمز وليس أي نوع آخر من التركيب . وهكذا اذا دعونا
احدى هذه الفترات الخاصة بالتركيب ب بتسمية مثل ح (ب) ،

واخذنا بعين الاعتبار كل التراكيب المكونة من ن رمز ، نحسب مجموع
الانثروبي لكل منها على حدة ، ونعتبر توليد كل تركيب على انه مصدر
بالتركيب الخاص ب من ن رمز الذي سبق اختيار الرمز س ل ، تكون
الانثروبي المطلوبة :

$$= \begin{matrix} \text{ح} & \text{ل} & \text{ح} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{ل} & \text{ح} & \text{ل} & \text{ح} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{ل} & \text{ح} & \text{ل} & \text{ح} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix}$$

يعني ارتباط الرمزين م ، ل اشارة التجميع مساهمة كل الحدود
المذيلة بأحد الدليلين م ، ل في المجموع المذكور .

اذا زدنا عدد الرموز ن السابقة للرمز س ل بحيث يصبح كبيراً جداً
تقترب القيمة ن بشكل مطرد من انثروبي المصدر . واذا لم يكن هناك

أي تأثيرات احصائية صادرة من مصادر تبعد عن الرمز المعتبر بأكثر من
ن رمز كانت ن هي قيمة الانثروبي الحقيقية (تصح هذا الحالة من

أجل مصدر يولد الأزواج وقيمة ل ن = ١ ، أو مصدر يولد التراكيب
الثلاثية وقيمة ل ن = ٢) .

يكتب شانون العلاقة الأخيرة بشكل مختلف قليلا . ان حاصل ضرب احتمال اصدار التركيب الممنوع (ب ،) في احتمال ورود الرمز

س بعد التركيب ب : $\sum (س) =$ يساوي احتمال اصدار التركيب ب متبوع بالرمز س وهو وفق شانون : $(ب ، س) =$ وهذا تصبح العلاقة الأخيرة على الشكل :

$$ت = - \sum_{س, ب} (ب ، س) \log (س) =$$

اعتبرنا في الفصل الثالث الآلة المنتهية الحالات كذلك التي وضعها الشكل ٣ - ٣ ، كمصدر للنصوص . يمكننا ان نستند في حساب الانتروبي الى هذه الآلة حيث نعتبر كل حالة من حالاتها كمصدر للرسائل ونحسب الانتروبي المقبلة ، ثم نفرمها باحتمال ان تصبح الآلة في تلك الحالة وتجمع كل الحدود الماثلة لنحصل على القيمة الاجمالية للانتروبي

ننتقل الى الصياغة الرمزية لهذه الافكار . نفرض انه عندما تكون الآلة في الحالة م ، يكون بمقدورها ان تصدر الرمز ل باحتمال مقداره $(ل) =$ ، فاذا كتبت الآلة مثالا في الحالة التي نرمز لها بالعدد ١ . فقد يكون بمقدورها اصدار الرمز : $ل = ٣$ باحتمال قدره $٣/٤$ وهكذا نكتب :

$$٣ = (٣) \times ٣$$

تساوي الانتروبي الكلية للحالة م للآلة مجموع كل انتروبي مقابلة لاصدار رمز معين ل اي :

$$ت = - \sum_{ل} (ل) \log (ل) =$$

نصطلح الآن على أن الآلة احتمال ح_م أن تكون في الحالة م ، وهكذا تكون انتروبي الآلة لكل رمز ، على اعتبار أن الآلة مصدر للرموز :

$$H = - \sum_{m=1}^M p_m \log_2 p_m$$

نعيد كتابة ذلك بالشكل التالي :

$$H = - \sum_{m=1}^M p_m \log_2 p_m = - \sum_{m=1}^M p_m \log_2 \frac{1}{p_m}$$

مرة أخرى ، يعني ارتباط الدليلين م ، ل بإشارة المجموع مساهمة كل الحدود المزدوجة يهدين الدليلين في المجموع المذكور .

لقد حققنا وبغاية البساطة النقلة من حساب الانتروبي لحالة مصدر يولد الرموز بشكل مستقل إلى حالة مصدر يولد الرموز معتمداً في توليده لكل رمز على ما سبق من الرموز ، كما استعرضنا بدائل ثلاثة لحساب أو تعريف الانتروبي الخاصة بمصدر مرسل ، حيث تتكافئ هذه البدائل وهي ذات صحة مقبولة في حالة المصادر المستقرة . علينا أن نتذكر لسي هذا المعرض أن مصادر النصوص اللغوية تعتبر وبشكل تقريبي مصادر مستقرة .

ليس تعريف الانتروبي لكل رمز بالشكل المتكامل السابق نهاية المطاف إذ تبرز مشكلة أهم وهي كيف نربط تلك الانتروبي بشكل واضح مع عدد الأرقام الثنائية لكل رمز اللازمة لترميز الرسالة .

لقد رأينا أن تجزئة الرسالة في تراكيب من الأحرف أو الكلمات ومعاملة كل تركيب كرمز يمكننا من حساب الانتروبي لكل تركيب باستخدام العلاقة الخاصة بحساب الانتروبي لكل رمز على حدة ، وأن زيادة حجم التراكيب تقربنا أكثر وأكثر من انتروبي المصدر .

تنحصر المشكلة اذن في اكتشاف طريقة الترميز الفعال باستخدام الارقام الثنائية لسلاسل الرموز المنتقاة من زمرة كبيرة جدا من الرموز ، حيث يحكم اختيار كل رمز احتمال معين . اوضح شاقون وفانو كيفية اجراء مثل هذا الترميز المطلوب ، بينما هوفمان طريقة احسن سنستمر فيها فيما يلي .

سندرج بهدف الايضاح كل الرموز الممكنة وفق احتمالاتها المتناقضة نفرض ان هذه الرموز هي الكلمات التالية : ال ، رجل ، الى ، يركض ، بيت ، يحب ، حصان ، يبيع والتي ترد بشكل مستقل وفق احتمالات محددة لدى اختيارها . يوضع الجدول التالي هذه الرموز مع احتمالاتها :

الكلمة	الاحتمال
ال	50%
رجل	15%
الى	12%
يركض	10%
بيت	4%
يحب	4%
حصان	3%
يبيع	2%

نحسب الانتروبي لكل كلمة باستخدام علاقاتنا السابقة فنجد انها 2.21 بيت لكل كلمة . اذا ربطنا بكل كلمة احد الاعداد الثنائية الثمانية المكون كل منها من ثلاثة ارقام ثنائية ، لاحتجنا بالتالي لثلاثة ارقام بهدف بث كل كلمة . كيف يمكن ان نرمز الكلمات بشكل اكثر فعالية .

يوضح الشكل 5 - 3 اكثر الطرق فعالية لترميز لارسالة كلمة بتكلمة ندرج الكلمات على يسار الشكل ونضع الاحتمالات بين اقواس . نختار اولا الاحتمالين الادنى كمرحلة اولى لانشاء الترميز المطلوب : يبيع 2% ، حصان 3% . ثم نرسم خطين باتجاه النقطة 5.0. وهي احتمال يبيع

ندرج فيما يلي ترميز كل كلمة :

الكلمة	الاحتمال: ح	الرمز	عدد الأرقام في الرمز ن	حاصل الضرب ح × ن
ال	٪٥٠	١	١	٪٥٠
رجل	٪١٥	٠٠١	٣	٪٤٥
ألي	٪١٢	٠١١	٣	٪٣٦
يركض	٪١٠	٠١٠	٣	٪٣٠
بيت	٪٠٤	٠٠٠١١	٥	٪٢٠
يحب	٪٠٤	٠٠٠١٠	٥	٪٢٠
حصان	٪٠٢	٠٠٠٠١	٥	٪١٥
يبيع	٪٠٢	٠٠٠٠٠	٥	٪١٠
٢٠٢٦				

يعطى حاصل ضرب احتمال ورود الكلمة في عدد الأرقام المتضمنة في رمزها العدد الوسطي للأرقام في كل كلمة محتواة في رسالة طويلة والناجم من ورد تلك الكلمة . يساوي مجموع . حواصل الضرب المذكورة ٢٠٢٦ ، وهذا هو أكبر بقليل من الانتروبي المحسوبة لكل كلمة والتي وجدناها ٢٠٢١ بيت لكل كلمة ، إلا أن هذا المجموع أقل من عدد الأرقام التي يمكن أن نستخدمها لتمثيل كل كلمة والمساوي لـ ٣ أرقام .

لا تقتصر ميزات طريقة هوفمان على أنها الطريقة الأكثر كفاءة لترميز مجموعة من الرموز لها احتمالات مختلفة ، بل يمكننا أن نبرهن أن ما نستخرجه من أرقام يزيد بقليل عن قيمة الانتروبي (كانت الزيادة في مثالنا ٠.٥ من الرقم الثنائي لكل رمز) ، وأن هذه الزيادة لا قيمة لها البتة .

نفرض أننا نقوم بدمج الرموز قبل ترميزها في تراكيب مكونة من رمز ، اثنين ، ثلاثة ، أو أكثر . سيرتبط بكل من هذه التراكيب احتمال معين (يساوي في حالة الخيار المستقل للرموز حاصل ضرب الرموز المنتقاة لإنشاء سلسلة معينة) . يمكننا استخدام طريقة هوفمان لترميز هذه

التراكيب . عندما نزيد حجم التراكيب ، يزيد بالمقابل عدد الأرقام الثنائية المثلة لكل تركيب . إلا أن طريقة هوفمان تستمد من الأرقام الثنائية لكل تركيب ما يزيد قليلا عن الانتروبي . وهكذا أن الزيادة المطرد لعدد الأرقام الثنائية المستخدمة لترميز تركيب معين والناتج عن ازدياد عدد الرموز في كل تركيب ، سيؤدي عندما يبلغ طول الرمز حدا كبيرا جدا إلى إهمال الجزء البسيط للغاية الذي يعرف عدد الرموز في طريقة هوفمان عن الانتروبي ، وستساوى في النهاية الانتروبي مع عدد هوفمان .

نصور قناة اتصال يمكنها بث عدد من نبضات القطع والفصل مساوي لـ ص في كل ثانية يمكن لهذه القناة إمرار ص رقم ثنائي . إذا كانت ت هي إنتروبي مصدر الرسائل مقاسة بالبيت في كل ثانية ، وكانت ت أقل من ص ، فإن استخدام طريقة هوفمان سيسمح من إرسال الاشارات المرمزة عبر هذه القناة .

لا تمرر كل الألفية الأرقام الثنائية ، فبعض الألفية مثلا تسمح بثلاثة نبضات من شدات مختلفة ، أو نبضات مختلفة بأطوال مختلفة كشفرة مورس مثلا . نستطيع بذلك تصور قناة واحدة وقد وصلت إلى عدة مصلد للرسائل لكل منها إنتروبي خاصة وسرعة إصدار للمعلومات ونختار منها المصدر ذي الإنتروبي الأعظمية ونسمي هذه الإنتروبي سعة القناة ونرمز لها بالرمز ص ، تقاس طبعا بالبيت في الثانية .

يفضي استخدام طريقة هوفمان إلى ترميز خرج القناة عندما تبث رسالة ذات إنتروبي أعظمية باستخدام أقل عدد ممكن من الأرقام الثنائية في الثانية ، وعندما تعتبر رسائل معتدة مرمزة في سلاسل ممتدة من الأرقام الثنائية ، يلزم عدد من الأرقام الثنائية قريب جدا ، لـ ص لتمثيل الاشارات المبررة للقناة .

يمكن استخدام أسلوب الترميز هذا باتجاه معاكس ، اذ قد نلجأ لترميز عدد من الارقام الثنائية مساوي لـ ص في كل ثانية وارسالها عبر القناة وهكذا نستطيع ترميز مصدر ذي انتروبي بـ باستخدام ت رقم ثنائي في الثانية ، وامرار ص بيت في كل ثانية عبر قناة منزلة سمعتها ص .

لقد اصبحنا الآن في وضع يمكننا من تقديم واحدة من اهم النظريات المرتبطة بنظرية المعلومات . دعها شانون بالنظرية الاساسية للاقتية .
الغالية من الضجيج ، وصافها على النحو التالي :

نفرض مصدرا ذي انتروبي ت بيت لكل رمز وقناة سمعتها في الارسال ص بيت في الثانية . يمكن في اطار هذا الافتراض ترميز خرج المصدر بحيث يبت بسرعة وسطية مقدارها $(\frac{ص}{ت} - هـ)$ رمز في الثانية عبر القناة حيث هـ كمية صغيرة للغاية ، ولا يمكن ان يبت بسرعة وسطية تتجاوز القيمة $\frac{ص}{ت}$.

نعيد مرض هذه النظرية بعيدا عن تقنياتها الرياضية . لكل قناة منزلة معتبرة لها سعة ص خاصة بها ، سواء انقلنا تلك القناة الارقام الثنائية ، الاحرف والاعداد ، او النقاط ، الفواصل والخطوط من طول معين ، كما ان لكل مستقر انتروبي معينة ت . لذا كانت اقل او تساوي ص فاننا نستطيع بث الرسائل التي يولدها المصدر عبر القناة . أما اذا كانت اكبر من ص ، فعلينا الا نبث الرسائل المولدة من المصدر عبر القناة ، لان جهودنا لتحقيق ذلك ، ببساطة ، لن تفلح .

اوضحنا فيما تقدم كيفية برهان القسم الاول من هذه النظرية ، بينما لم نتطرق الى استحالة ترميز مصدر ذي انتروبي ت بعدد من الارقام الثنائية لكل رمز اقل من ت ، الا ان ذلك يمكن برهانه ببساطة .

نشعر في هذه المرحلة اننا احطنا وبثقة بحقيقة هامة مفادها ان انتروبي المصدر المرسل مقاسة بالبيت تطلعننا على عدد الارقام الثنائية

اللازمة لكل حرف أو كلمة أو في كل ثانية من أجل بث الرسائل التي يولد المصدر . (تقابل هذه الأرقام الثنائية نبضات الفصل والوصل ، واصطلاحات نعم ولا) يرجع هذا التمييز إلى بحث شانون الاساسي . واقع الامر ان مصطلح بيت وهو في اللغة الانكليزية Bit منحوت باختصار من كلمتين Binary اي ثنائي و digit اي رقم .

تختلف الانتروبي ، على كل حال ، مقدرة بالبيت عن عدد الأرقام الثنائية على الصعيد العملي . نعرض على سبيل المثال مصدر رسائل يولد بشكل عشوائي الرمز 1 وفق احتمال مساو لـ 1/2 والرمز 0 باحتمال مقابل يساوي 1/2 ، وان ذلك المصدر يولد الرموز المشار إليها بسرعة 10 رموز في كل ثانية . صحيح ان هذا المصدر يعطي الأرقام الثنائية بمقدار 10 أرقام في كل ثانية ، الا ان السرعة المعلوماتية له والانتروبي تساوي فقط 11.4 ر. بيت لكل رقم ثنائي وهي تساوي 11.4 بيت في كل ثانية . نستطيع ترميز سلسلة الأرقام الثنائية المنتجة من قبل هذا المصدر باستخدام عدد وسطي من الأرقام الثنائية مساوي لـ 11.4 في كل ثانية .

نفترض ، شكل ممثال قناة اتصال قادرة على نقل 10,000 نبضة قطع ووصل في كل ثانية . ان سعة هذه القناة هي 10,000 بيت في كل ثانية حسب ما تقدم ، الا ان استخدامها لنقل نموذج متكرر من النبضات سيعني بالتالي عدم نقلها أي معلومات ، بشكل أدق تكون سرعة نقلها للمعلومات في هذه الحالة مساوية لصفر بيت في الثانية على الرغم من سعتها التي اشرنا إليها .

انطوى ادراجنا لمفهوم البيت هنا على المقايسة الثنائية لكمية المعلومات ، كقياس الانتروبي أو سرعة المعلوماتية لمصدر رسائل وفق واحدة البيت لكل رمز أو البيت في الثانية ، أو كقياس لامكانيات قناة ما في مجال نقل المعلومات مقاسة بالبيت لكل رمز أو البيت في الثانية . نستطيع وصف البيت على انها خيار أولي ثنائي أو قرار يبين امكثيتين متساويتين الاحتمال . تمثل البيت عند مصدر الرسائل كم محدد من

إذا عدنا إلى مثالنا في حالة طريقة هوفمان نلاحظ أن أي من الرموز الواردة لا يشكل الجزء الأول من رمز آخر . تسمى هذه الظاهرة بخاصة البدء ولها نتائج هامة ومدهشة سهلة الإيضاح . نفرض مثلاً أننا نرمز الرسالة : الرجل يبيع البيت إلى الرجل الحصان يركض إلى الرجل . تكون الرسالة المرمزة على الشكل التالي :

ال	رجل	يبيع	ال	بيت
١	٠ . ٠ . ١	٠	١	١ ١ . . .
			ال	رجل
ال	رجل	رجل	ال	حصان
١ ١	١	٠ . ١	١	٠ ١
ال	رجل	رجل	ال	حصان
ال	ال	ال	ال	رجل
٠ ١ ٠	٠ ١ ١	١	٠ ٠ ١	
يركض	ال	ال	رجل	
يركض	ال	ال	رجل	

كتبنا هنا كلمات الرسالة فوق الرموز . أما الكلمات تحت الرموز فقصدها بها إمكانية تطيل خاطيء لحتوى الرسالة لدى المستقبل ، إذ قد يحدث أننا لن نتلق الرسالة إلا بدءاً من رمز البيت ١١٠٠٠ . وأن الصفر الأخير منه لم يرسل بسبب ما ، لذا نطيل الكلمة الأولى وفق رموزنا على أنها (الرجل) ، إلا أننا نلاحظ بعد ذلك أن الرسالة سرعان

ما استمد صحتها . ليس من الضروري أن نعرف المقطع حيث بدأت الرسالة حتى يتسنى لنا تحليلها بشكل صحيح ، إلا إذا كانت الرموز من نفس الطول .

إذا نظرنا إلى الوراثة قليلاً نجد أننا حققنا أهداف هذا الفصل . فقد توصلنا إلى قياس المعلومات التي يولدها مصدر مستقر وهو قياس منسوب لكل رمز أو لكل ثنائية من الزمن، وأوضحنا كيف أن هذا القياس يكافئ القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية اللازمة لبيت الرسائل التي تنبثق من المصدر المذكور . كما رأينا أن تحقيق الإرسال باستخدام ما يزيد عن الانتروبي جزء طفيف من البيت ، يجب أن نرسم الرسائل التي يولدها المصدر في التراكيب طويلة ، ولا تقتصر على اعتبارها سلسلة من الرموز التفصيلية .

رب سأل يقول : ما هو الطول المفروض والممكن للتراكيب ، نعود هنا إلى اعتبار آخر . هناك سببان رئيسيان للترميز وفق التراكيب الطويلة . أما السبب الأول فهو أن نجعل القيمة الوسطية المستخدمة في طريقة هوفمان لعدد الأرقام الثنائية المقابلة لكل رمز أكبر بقليل من الانتروبي محسوبة لكل رمز ، في حين يتعلق السبب الثاني بتأثير الرموز السابقة على احتمال ظهور رمز معين سيما عندما نواجه موضوع الترميز الفعال للنصوص اللغوية . رأينا أن ذلك ممكن من حيث المبدأ باستعمال التراكيب الطويلة والعلاقة الخاصة بحساب الانتروبي لكل رمز .

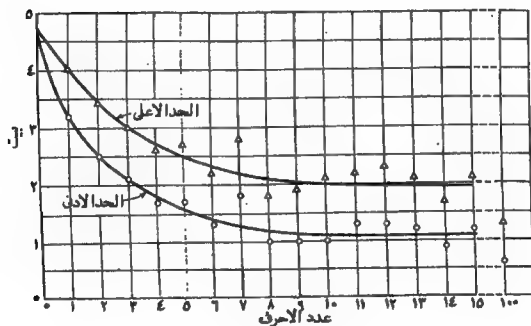
نطرح ، إذن ، السؤال مرة أخرى ، ولكن في صيغة جديدة :

كم عدد الرموز التي يجب أن يحتويها كل تركيب بحيث يتحقق الشرطان :

١ - ترميز هوفمان له كفاءة عالية . ٢ - إذا اعتبرنا الانتروبي لكل تركيب بأعمال علاقات التركيب مع ما يقع خارجه ، فإن هذه الانتروبي يجب أن تكون قريبة جداً من حاصل ضرب العدد في الانتروبي لكل رمز . إذا كنا بصدد النصوص اللغوية ، فإن الشرط الثاني هو الأكثر أهمية .

حسب شانون الانتروبي لكل حرف في حالة النصوص الانكليزية
 بقياس قايلية شخص ما لتخمين الحرف التالي من النص بعد رجوعه
 الى الحرف الاول والثاني والثالث ... الخ مما سبق من الاحرف.
 استندت تلك النصوص بالطبع الى الابدنية الانكليزية المؤلفة من ٢٦
 حرف مع فراغ اضافي .

يوضح الشكل ٥ - الحدين الأدنى والأعلى الانتروبي للنصوص
 الانكليزية بدلالة الاحرف التي اطلع عليها الشخص المعني قبل إصدار
 حروء المنتظر .



الشكل ٥ - ٤

ينخفض المنحني بشكل ملحوظ بين العددين ١٥ - ١٠٠ اللذين
يشيران لعدد الأحرف ، بينما يهبط ببطء بين العددين ١٠ - ١٥ ، يؤكد
ذلك أن الترميز الفعال للنصوص اللغة الانكليزية يقضي استخدام تراكيب
لا تقل أطولها من ١٠٠٠ حرف .

نمطينا قراءة الشكل ٥ - { قيمتين هما ٦.٣ ، ٣.١ بيت لكل حرف ،
تنحصر بينهما انتروبي النصوص الانكليزية . دعونا نفرض القيمة ١ لتلك
الانتروبي ، فنحتاج اذ ذاك الى ١٠٠ عدد ثنائي لترميز تركيب مؤلف
من ١٠٠ حرف . يعني هذا أن هناك 2^{100} سلسلة ممكنة من التراكيب
الانكليزية . يحتوي كل منها على ١٠٠ حرف . والاعطاء فكرة عن حجم
العدد 2^{100} نقول أنه يساوي تقريبا واحد متبوع بـ ٣٠ صفر ، يا له من
عدد هائل .

يقودنا البحث من احتمال ورود كل التراكيب ذات المعنى المؤلف كل
منها من ١٠٠ حرف من الأبجدية الانكليزية ، الى حساب التواترات
النسبية لكل تركيب ، إلا أننا سرعان ما سندرك استحالة هذه العملية
عندما نعلم أن هناك تقريبا من هذه التراكيب 2^{100} تركيب مختلف .

إلا أن ذلك مستحيل أصلا من حيث المبدأ ، فمعظم التراكيب
المعدودة من أصل 2^{100} تركيب لم تكتب بعد ، علما أن العدد 2^{100} لا يشمل
فعلا كل التراكيب ذات المعنى . تؤكد بالتالي استحالة الحديث من
التواترات النسبية والاحتمالات الخاصة بهذه التراكيب وفق ورودها
في النصوص الانكليزية .

تواجهنا هنا معضلتان : ما هي دقة توصيف النصوص اللغوية
باعتبارها ناتج مصدر مستقر ، وما هي الخصائص الاحصائية الاساسية
لذلك المصدر . قد نميل الى الاعتقاد بوجود احتمالات مناسبة لدى
الانسان حتى إذا لم يكن تقييمها ممكناً بتفحص النصوص المكتوبة . أو

لربما أن تلك الاحتمالات موجودة فعلاً وأن معرفتها ممكنة ليس من خلال الطريقة البدائية لحساب احتمالات ورود سلاسل الأحرف ، بل بإتباع أسلوب آخر أكثر نجاعة . لقد استعرضنا علاقات مختلفة لحساب الانتروبي في حالة المصدر المستقر وحالة الآلة المتناهية الحالات ، كما عرجنا في نهاية الفصل الثالث على فكرة اعتبار الإنسان في حالة معينة وانتاجه تبعاً لذلك لرمز أو كلمة ، ورأينا أن مثل هذه الفكرة جديرة بالاهتمام فعلاً .

يعارض بعض اللغويين بحجة أن القواعد اللغوية لا تتفق وخرج الآلة المتناهية الحالات . نمتدح في هذا الصدد أنه لفهم بنية النصوص اللغوية والانتروبي الخاصة بها أن نتمق أكثر في دراسة النصوص اللغوية مما فعلناه حتى الآن .

إن تطبيق نظرية رياضية بشكل مباشر ميكانيكي على حقل الافتراضات المجردة التي انبثقت منها تلك النظرية ، هو عمل على جانب كبير من الأمان وفي غلبة المهلة . بينما علينا أن نلتزم أكثر بالحكمة والتعقل عند تطبيق نظرية رياضية على أمور واقعية ، مهما كانت تلك النظرية جيدة ومناسبة . لذا رغبنا فعلاً بربط النصوص اللغوية بنظرية الاتصالات وإنجاح هذا الربط أكثر ما يمكن ، فعلينا أن نسعى إلى أشكال بسيطة وواقعية للقوانين الحاكمة لتلك النصوص . تنطوي تلك القوانين بالطبع على قواعد اللغة ، وسنستعرض تلك القواعد في الفصل القادم .

وفي كل الأحوال ، فإننا نعلم معلومات إحصائية جيدة عن النصوص اللغوية ، كتواتر الكلمات والأحرف ، كما تؤهلنا نظريات الترميز للاستفادة من كل تلك المعلومات .

إذا رمزنا النصوص الانكليزية حرفاً بحرف ، غاضين النظر عن التواترات النسبية للأحرف يلزمنا عندها ٢٧ حرف ، رقم ثنائي لكل حرف ، ونعتبر الفراغ في هذه الحالة حرف ، بينما إذا كررنا نفس العملية

أخذين بعين الاعتبار التوافرات النسبية للأحرف ، يصبح الرقم المذكور ١٠٠٣ رقم ثنائي لكل حرف . أما إذا رمزناها كلمة بكلمة وفق التوافرات النسبية للكلمات نحتاج لـ ١٦٦١ رقم ثنائي لكل حرف . ولقد استطاع شانون باستخدام طرق مبدعة تحديداً لانتروبي للنصوص الانكليزية بين العددين ١٠٠ - ١٠٣ بيت لكل حرف ، ونأمل بذلك ان نلتقي ترميزاً أكثر فصالية .

إلا ان اندفاعنا بشكل ميكانيكي في اتباع طريقة معينة حتى نهايتها لحساب الانتروبي ، قد يضعنا في مواجهة صعوبات كبيرة ويضيع جوهر بحثنا . وإذا حدث ذلك فيعود بشكل جزئي الى الفروق بين الانسان كمصدر للنصوص اللغوية وبين نموذج المصدر المستقر الذي درسناه ، وأما السبب الجزئي الآخر فهو طريقة التناول غير الملائمة . إن نموذج الانسان كمصدر مستقر للنصوص هو نموذج جيد ومفيد إلا انه ليس كاملاً بالطبع ، لذا نقيم عالياً هذا النموذج .

لقد كان هذا الفصل طويلاً وغنياً بالتفاصيل ، ويحتاج قبل إنهائه الى عرض موجز . لن نستطيع بالطبع تلخيص كل ما قدمناه ، فقد احتاج ذلك التقديم الى صفحات كثيرة . لذا سنكتفي بالتركيز على النقاط الهامة وحسب .

تقدر الانتروبي الخاصة بكل اشارة في نظرية الاتصالات بالبيت لكل رمز او لكل ثانية وهي تعطي القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية لكل رمز او لكل ثانية ، الضرورية لترميز رسالة ينتجها مصدر ما .

نصور مصدر الرسائل على انه يختار بشكل عشوائي ، أي بشكل غير قابل للتنبؤ ، رسالة من بين رسائل متعددة ممكنة . لذا نربط الانتروبي في حالة المصدر بمقدار الخيار الذي يمارسه المصدر في انتقاء رسالة معينة ستثبت فعلاً .

أما من المستقبل ، فنفرض أنه قبل استلامه للرسالة سيكون غير أكيد فيما يتعلق بالرسالة التي سيولدها المصدر ويرسلها إليه . بناء على ذلك، ننظر الى انتروبي مصدر الرسائل كميال لريبة المستقبل حول الرسالة التي ستصل ، وهي ريبة ستحل عند استلام الرسالة .

إذا تم اختيار الرسالة من بين عدد من الرسائل متساوية الاحتمال كان الانتروبي لع ن ، حيث ن هو عدد الرسائل الممكنة . ويبدو هذا التعريف طبيعياً للغاية ، لأنه إذا توفر لدينا عدد من الأرقام الثنائية يساوي لع ن ، لتمكنا من استخدامها في كتابة مجموعة من الأعداد الثنائية تضم :

$$\text{لع ن} = \text{ن} \quad \text{عدد ثنائي} .$$

وسنربط الرسالة المولدة بأحد هذه الأعداد . إما إذا لم تكن الرموز متكافئة الاحتمال ، وهي الحالة العامة ، فتعطي الانتروبي وفق أول علاقة مرصناها في هذا الفصل . إذا اعتبرنا تركيباً طويلاً من الرموز ، لا يعتمد محتواه الا قليلاً على ما سبقه من الرموز ، ونظرنا إليه كرمز جديد ، فيمكننا تعديل العلاقة المذكورة لنحصل على انتروبي المصدر لكل رمز ، حيث يعتمد اختيار رمز معين على الرموز التي سبق وجرى اختيلها . تفسح هذه الأفكار المجال لنا لاستنتاجات علاقات أخرى خاصة بالانتروبي كانت في عداد مواد هذا الفصل .

إذا استخدمنا طريقة هوفمان في الترميز ، وهي طريقة ذات كفاءة عالية ، نستطيع ان نبرهن أن انتروبي المصدر المستقر مقاسة بالبيت تساوي القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية اللازمة للترميز .

قد لا تمرر قناة اتصال نموذجية الأرقام الثنائية ، ويمكن أن تحمل الأحرف او الرموز الأخرى . نتصور أننا وصلنا عدة مصادر الى مثل هذه القناة ، وبحسنا بعد ذلك بوسائل رياضية من المصدر الذي سيجعل

الفصل السادس

اللغة والمعنى

يتلخص الانجزان الكبيران لنظرية المعلومات بتعريف وحساب استطاعة القناة وعلى الاخص تحديد عدد الأرقام الثنائية اللازمة لارسال المعلومات من مصدر معين ، وكذلك ان سرعة المعلومات عبر قناة مشوبة بالضجيج يمكن ان تلخذ كل القيم المتزايدة طالما ان الارسال يحدث دون اخطاء رغم وجود الضجيج ، تقدر هذه السرعة بالطبع بالبيت لكل حرف او البيت لكل ثانية يجب ان تثبت كل النتائج وفي كل الاحوال للمصادر والاتنية المتقطعة وكذلك المستمرة .

لقد استنفدنا مرحلة اعداد طويلة في الفصول الاربعة الاولى أصبح بمقدورنا بعدها وفي الفصل الخامس طرح مشكلة عدد الأرقام الثنائية اللازمة لارسال المعلومات المولدة عن مصدر مستقر فعلي . لو كان هذا الكتاب مجرد كتاب مدرسي عن نظرية المعلومات ، لانتقلنا لذن الى المرحلة المنطقية التالية ، وهي القناة المشوبة بالضجيج ومن ثم القناة المستمرة والمستقرة .

الا ان افكارنا سرعان ما ستعود عند نهاية هذه العملية المنطقية المتقدمة الى اعتبار مصادر الرسائل في العالم الواقعي ، والتي يمكن وصفها بتقريب ما على انها مستقرة ومن ثم حساب الانتروبي الخاصة بها . والبحث من اكثر الطرق كفاءة في ترميز الرسائل الصادرة عنها .

ونحن بدورنا سنتوقف هنا عن الاسترسال في الشروح الرياضية لنظرية الاتصالات ونتناول أكثر أدوات الاتصال تشويقاً وجاذبية ، نضني اللغة ، ولكن من منظور نظرية الاتصالات . إذ يحق لنا وقد علونا قمة من قمم المعرفة المتواضعة أن ننظر منها الى جانب هام من حياتنا ، وأن نتبين فيما اذا كانت مشاكل اللغة والمعنى تبدو مختلفة في اطار ما تعلمناه .

نطلب من القارئ العزيز ان يكون حذراً في هذه السياق . لقد كان تركيزنا حتى الآن على ما نعرفه ، وما نعرفه هو النواة الصلبة لتعلم . يجد العلماء صعوبة بالغة في مشاركة الانسان العادي بما يعرفونه . اعتقد بنه على ذلك ان الاحاطة بالمعارف العلمية تقتضي جهوداً جبارة كتلك التي بذلها القارئ عبر الفصول القليلة السابقة .

على ان هناك جانباً أبسط وأكثر امتاعاً للعلم . انه ذاك الضرب من الجهل الملحن . يختلف جهل العالم من جهل الانسان العادي ، ذلك لان الخلفية العلمية لدى العالم والمكونة من النظريات والحقائق المثبتة تمتد عن ميدان تنبؤاته كل الافتراضات والتصورات التي لا معنى لها . أما الشكل الأعلى والحدي من جهل العالم وهو الذي نطلق عليه اسم الجهل الملحن فيشمل أصل الكون والأصول العميقة للمعرفة وعلاقة مستوى المعارف الحالية بالإرادة الحرة والأخلاقيات والسياسة . سنحوم في هذا الفصل الخاص حول موضوع اللغة بشكل يمكن أن نطلق عليه من وجهة النظر العلمية انه الجهل الملحن بموضوع اللغة .

نعود فتؤكد أن ما سنعرضه في هذا الفصل ليس أكثر من بنود نابغة من الجهل الملحن ، وهذا التأكيد ضروري للغاية إذ قلما يجد الانسان غير المتخصص وسيلة ناجمة يستطيع بواسطتها التفريق بين الحقيقة العلمية والجهل العلمي . ان الجهل اسهل تمثلاً من العلم ذلك لان الجهل يمكن التعبير عنه بعبارة عريضة شديدة العمومية وجمل ذات كفاءة منخفضة بالمقارنة مع الحقيقة ، ولان الجهل اضافة الى ذلك معنى بالمشاكل غير المحولة فهو أكثر رومانسية . ينتشر الجهل أكثر ويجد له سدى أوسع بالمقارنة مع الحقائق العلمية .

وإذا كان الجهل خطراً بهذا الشكل على الإنسان العادي ، فله موقع مهم لدى العالم ، فمنه يكون العالم الرؤى المحيطة بالموازم البعيدة والأبعاد غير المنظورة ، وهذا ينزع الاحساس الآتي بالراحة والرضى الدائمي لديه ويستحثه لإسراع خطاه على طريق الاكتشاف بدلا من مجرد السير البطيء على ذلك الطريق . عندما يحس العالم بجهله ، فسرعان ما سيخطط لما يتوجب عليه أن يفعله ، في حين أن الإنسان العادي لن يستطيع ذلك وسيته في أجواء الجهل الضبابية دون أن يجد أي فرصة لوضع قدمه على أرض المعرفة الآمنة .

نعود الآن الى حيث واجهنا مشكلة اللغة لننتقل من هناك ، بعد أن وضعنا الخطوط العامة لمبادئ تقدمنا في أرض مجهولة .

سنقتصر فيما يلي من بحثنا على قواعد اللغة الانكليزية . نعرف جميعاً أن اللغة اليومية الدارجة لا تخضع لقواعد اللغة ، مثلما مؤلفات غير ترود شتاين . ويظهر الخروج من قواعد اللغة خاصة في المحاضرات العلمية والتكنيكية . يذهب المفاولون في الالتزام بقواعد اللغة حد رفض كثير من الأشعار الجيدة ، بحجة عدم موافقتها لتلك القواعد .

لذا فإن استمراض قواعد اللغة لا يعني تغطية كل الجمل المنطوقة او المكتوبة وجل ما يفعله هو أنه يرسى مساراً إجمالياً يمكن أن نتبعه باهتمام وبشكل منظم .

عرفنا فيما سبق أن كتابة أي نص لغوي يجب أن يخضع الى عدد من القيود . يمكن أن نجد تفاصيل كل تلك القيود في كتاب متكامل من قواعد اللغة . تفند تلك القواعد الأحكام اللازمة لإنشاء أي سلسلة من الكلمات التي سيتم قبولها في وقت معين ووفق معيار معين على أنها منسجمة مع القواعد .

إن قضية قبول الإنشاء اللغوي من وجهة نظر القواعد هي قضية شائكة وغير واضحة المعالم ، فكثيراً ما تقبل مخالافات للقواعد وفق المؤلف

ووفق منزلة الكتاب وغالباً ما تكون نفس المخالفات غير مقبولة اذا استخدمت في مجالات اخرى . وبصورة عامة يتغير ما هو مقبول بالنسبة للقواعد بشكل مستمر . قصدنا بذلك مجرد الملاحظة وننتقل الآن الى مواضيع اخرى .

تتضمن القواعد مجموعة من الاحكام المسبقة التي تسمح بالإنشاء اللغوي الاصولي ، اي الإنشاء الخاضع لتلك الاحكام وحسب . والى جانب ذلك فهذه الاحكام مهمة اخرى ، اذ بواسطتها نتمكن من تمييز كل الجمل والمقاطع المتفقة مع تلك الاحكام والواردة في نص معين ، من الجمل والمقاطع الاخرى غير المتفقة معها .

اذا استعلمنا الاحاطة بتلك الاحكام كان بإمكاننا اجراء تقييم جديد للانثروبي النصوص الانكليزية ، اذ نميز في هذه الحالة الاجزاء التي هي عبارة عن تطبيق ميكانيكي ومباشر للقواعد والاجزاء الاخرى التي تنطوي على خيار او ريبية وتساهم بذلك في الانثروبي . ونستطيع ، اكثر من ذلك ، بث الرسائل اللغوية بشكل فعال بان نحمل الرسالة المعلومات المتعلقة بالخيارات الممارسة أثناء الإنشاء ، ونستخدم هند المستقبل آلة قواعد خاصة تعيد انشاء الجمل وفق اصول القواعد استناداً للخيارات المدرجة في الرسالة المستقبلية .

ليست احكام القواعد هي كل شيء في اللغة ، فقد تبدو جملة ما في منتهى الغرابة رغم خضوعها الكامل لاحكام القواعد . يمكن لآلة انشاء لغوية لتعتمد كل القواعد بكل تفاصيلها ، ان تتركب جملة مثل : اكل الخبز الخبز . اذ ان كل ما تفعله الآلة هو جملة من الخيارات بين الكلمات آخذة بعين الاعتبار القواعد اللغوية ، اما الانسان فيبني خياراته بشكل مخالف ، اذ ان الكاتب يتبع احكام القواعد ، الا انه يجري خيلرات اخرى ايضا . ان فهم القواعد لن يكشف لنا كل اسرار اللغة ، الا انه سيدفعنا خطوة الى الامام على الطريق الصحيح .

ما هو نوع الاحكام التي ستتمخض عن جعل سليمة من وجهة نظر القواعد ، وعن كل الجمل بشكل عام ، حتى لو كانت الخيارات عشوائية . رأينا في الفصل الثاني كيفية انتاج نصوص شبيهة بالنصوص الانكليزية وذلك باختيار كلمة عشوائياً وفق احتمال ورودها بعد سلسلة معينة ومحددة الطول من الكلمات ، وكان مثالنا حين ذاك التقريب الثاني الذي ترد وفقه الكلمة على أساس الكلمة السابقة لها .

يمكن لأي منا انشاء تقريبات اعلى باستخدام المعارف اللغوية المخزنة في دماغه ، وهكذا يستطيع مثلاً تحقيق التقريب الرابع باعتباره ثلاثة كلمات متتالية وعرضها على شخص آخر لاضافة كلمة رابعة والحصول على جملة ، وبتكرار هذه العملية والانتقال من شخص لشخص قد نحصل على مقطع مثل : حدث ذلك في منظر ضبابي للأشجار المترنحة بهدوء على الجسر .

بعد هذا المقطع معقولا بكيفية ما لأن اختيار الكلمات لم يتم بشكل عشوائي وانما اجرته كائنات عاقلة . والشيء المدهش في مثل هذا المقطع ملائمته لاحكام القواعد ومنطقيته المقبولة على الرغم من أنه انشئ بشكل مطرد بإعطاء الكلمات الثلاثة الأخيرة من الجزء المتكامل منه عند مرحلة معينة والطلب الى شخص ما اضافة الكلمة الرابعة . وعلى الرغم من ذلك فقد نحصل أحيانا على مقاطع غير معتدلة البنية اذا اتبعنا نفس الطريقة ، مثلاً قد نحصل على المقطع : رأبته آخر مرة عندما عاش ، الذي يبدو ايضاً غير موافق لاحكام القواعد بشكل كامل .

إذا كان شانون على حق وإذا توفر في النصوص الإنكليزية خيار يكافئ ١ بيت لكل رمز ، فإن الاختيار من بين ٤ كلمات يعني حوالي ٢٢ خيار ثنائي ٢ أو خيار بين ١٠ ملايين تركيب في كل تركيب ٤ كلمات . يمكن من حيث المبدأ ان يقوم كومبيوتر بإضافة الكلمات استناداً لمثل هذا الجدول من التركيب ، إلا أن النواتج لن تكون ملائمة لاحكام القواعد بشكل مؤكد ، أضف الى أن هذه الطريقة الطويلة جداً قد لا تتمخض عن كل

السلاسل الممكنة من الكلمات الخاضعة لأحكام القواعد ، فهناك بعض سلاسل الكلمات التي قد تشكل جزءاً من جملة سليمة وفق القواعد في بعض الأحوال ولا يمكنها تحقيق ذلك في أحوال أخرى . وهكذا إذا لم نضمها فستأتي النتيجة ناقصة بعض الجمل السليمة وفق القواعد .

أما إذا اعتبرنا التراكيب المحتوية على أكثر من ٤ كلمات ٢ فسنفضل عندها القواعد على الكمال ، ويحدث العكس إذا خفضنا عدد الكلمات في كل تركيب من ٤ ، إذ عندها ستكون المفاضلة للقواعد على حساب الكمال .
إننا لن نستطيع جمع الاثنين .

تعاود الظهور ، في هذه المرحلة ، فكرة الآلة المتناهية الحالات . فلربما إننا نستطيع ربط آلة منتجة للجمل اللغوية ، تكون في حالة معينة عند كل نقطة من الجمل وهذا سيسمح لها بإجراء خيارات معينة وفق الحالات التي يمكن أن تنتقل إليها انطلاقاً من الحالة المحددة ، ولربما أن مثل هذه الآلة سيتمكنها التعامل مع أنواع معينة من الكلمات كالأسماء المفردة ، والصفات والأفعال وغيرها وبذات تستطيع إنتاج نصوص لغوية سليمة وفق القواعد وتفسح المجال لتضمين الكلمات فيها بأكثر من ملائمتها لأدراج سلاسل الكلمات .

يبدو تشبيه القواعد بالمتناهية الحالات مشجعاً بصورة خاصة ذلك لأن بعض وجهات النظر للإنسان ترى فيه آلة متناهية الحالات ، ببساطة لأنه يتكون من عدد محدد من الخلايا وبالتالي من عدد محدد من الدورات .

يرفض شومسكي ، وهو لغوي معاصر معتبر ، فكرة الآلة المتناهية الحالات كنموذج ممكن أو ملائم للقواعد اللغوية ، فهو يشير إلى عدد من أحكام إنشاء سلاسل الرموز التي تضمينها في مثل هذا النموذج . من هذه الأحكام مثلاً أن نختار على التتالي للأحرف الأبجدية بشكل عشوائي حتى ظهور الحرف Z ثم تكرر بعد ذلك كل الأحرف المدرجة اعتباراً من آخر ورود الحرف Z ولكن بترتيب معاكس ، نتابع بعدها في

مجموعة جديدة من الأحرف وهكذا . مستنتج هذه العملية سلسلة من الأحرف مجسده لنظام مديد ، اضافة الى أنه لا يوجد حد لعدد الأحرف المحصورة بين ورودين متتالين للحرف Z . لا تستطيع آلة متناهية الحالات بإمكانها تحقيق مثل هذه العملية .

يؤكد شومسكي أنه لا يوجد حد معين لطول الجملة سليمة وفق القواعد في اللغة الإنكليزية ، ويضيف أن جمل اللغة الإنكليزية مرتبة بشكل ينفي دور الآلة المتناهية الحالات كمنتج وحيد لكل نصوص اللغة الإنكليزية . ولكن هل نستطيع فعلا اعتبار جملة طولها كيلو مترات على أنها سليمة وفق القواعد سيما واننا علم أن أحدا ما لم ولن ينتج مثل هذه الجملة ، وحتى لو وجدت فستكون غير مفهومة .

إن تقرير مثل هذا الأمر لا يمكن بدون معايير معينة لتقرير سلامة النص وفق القواعد . يشير شومسكي الى ما هو سليم وما هو غير سليم وفق القواعد واعتقد أن معياره يستند الى ضرب من السياقية الطبيعية ، فالجملة حسب شومسكي سليمة وفق القواعد فيما اذا قيلت بصوت عالٍ وتطليع واضح وأصدر عليها هذا الحكم شخص يتفوه بها أو يسميها أن الأمور التي تقض مضجع الآخرين يبدو أنها لا تزجج شومسكي ربما لأنه يتحدث لغة إنكليزية متماسكة وسليمة وفق القواعد .

هل يمكن تضمين قواعد اللغة في آلة متناهية الحالات أو لا يمكن ؟ يطرح شومسكي شاهداً مقنعاً على خطأ محاولة إنشاء الجمل بجمل الخيار التالي للكلمة تابعا للكلمات التي سبقت . يستعيز شومسكي عن ذلك برؤية أخرى لإنشاء الجمل هي التالية :

نبداً بشكل أو آخر من عدة نماذج يمكن أن تأتي الجملة وفقها ، مثلاً فعل يتبعه فاعل . يسمى شومسكي هذا الشكل الخاص : الجملة الأساسية ، ثم يستحضر أحكام القواعد لتوسيع كل جزء من أجزاء هذه الجملة ، وقد يصل ذلك به الى جمل مختلفة مثل : قذف الرجل الكرة ، أو : أمسكت الفتاة القطة .

نلاحظ هنا ان فعل الخيار لم يمارس بشكل متسلسل عبر الجملة من بدايتها الى نهايتها ، بل تم اعتماد هيكل عام أو مخطط عام للجملة النهائية منذ البداية ، هذا المخطط هو الجملة الاساسية الذي نبره الى اركانه المختلفة حيث يتم اختيار الكلمة المناسبة وفق كل ركن . ينحصر الخيار هنا عند كل عقدة من هذا الهيكل الاشبه بشجرة والذي تقع الجملة الاساسية منه عند الجذر .

لقد شرحت افكار شومسكي هنا بشكل غير كامل ووفق خطوطها العامة . فمثلا لدى اعتباره بعض اشكال الكلمات غير النظامية يحدد شومسكي اولا الكلمة الاساسية وشكلها الإعرابي العام ، ثم يطبق بعض الاحكام الإجبارية لبوغ الشكل اللغوي الصحيح . وهكذا لإنشاء شومسكي المتفرع للجملة يعتمد بعض الاحكام الاختيارية التي تسمح بإجراء الخيار الحر الى جانب احكام اجبارية اخرى لا تسمح بأي خيار .

ان الفهم الفصل لشومسكي يقع خارج اهداف هذا الكتاب ويمكن الرجوع الى كتابه حول هذا الموضوع والمراجع الاخرى التي يشير اليها في كتابه .

ان على شومسكي ، طبعا ، ان يعالج مشكلة الجمل الفاضة ، مثل الجملة التالية : السيدة العالة جعلت الروبوت أسرع خلال الوقت الذي اكلت به . لقد ابلغني مؤلف هذه الجملة ، وهو باحث في نظرية المعلومات ، ان هذه الجملة تحمل أكثر من ٤ معاني مختلفة في إطار اللغة العملية . ان هذه الجملة صعبة للغاية اذا اختيرت كنموذج للدراسة والتحليل .

قد نعتقد ان مرد الفموض هو المعاني المختلفة التي قد يقطعها كلمة أو أكثر ضمن نفس الإنشاء الإعرابي ، كقولنا مثلا : كان مجنوناً ، بمعنى انه كان غاضباً او انه كان قد فقد عقله فعلاً ، او قولنا : كان الطيار حالياً ، بمعنى انه حلق بطائرته على ارتفاع عالٍ ، او كان عالياً في رده على استشاره ما . يعطي شومسكي مثالا بسيطا عن جملة غير واضحة تماماً ،

وسبب عدم الوضوح فيها هي احكام القواعد ، والجملة هي : صيد الصيادين ، وقد تفسر بمعنى الصيد الذي يجلبه الصيادون ، أو بمعنى آخر هو أن يقوم البعض بصيد الصيادين ، أي جعل الصيادين من جملة فرائسه .

يؤكد شومسكي أن تطبيق احكام تحويل مختلفة على جمل أساسية مختلفة يمكن أن يؤدي الى نفس السلسلة من احكام القواعد . مثلا ، إذا اعتبرنا الجملتين : اللوحة تم رسمها بواسطة فنان حقيقي ، اللوحة تم رسمها بواسطة أسلوب جديد ، فلاحظ التقابل الإعرابي الدقيق بينهما ، إلا أن الأولى يمكن أن تنتج من تحويل الجملة التالية : لقد رسم اللوحة فنان حقيقي ، أما الثانية فلا يمكن استنتاجها من جملة لها نفس الشكل . عندما تكون الكلمات النهائية والعناصر الإعرابية النهائية نفسها ، تكون غامضة .

يواجه شومسكي المشكلة الكبيرة بأن الحدود الفاصلة بين السلامة وفق الإعراب وبين صحة المعنى هي حدود غير واضحة . مثلا : الجملة : الأخضر عديم اللون ، هي جملة سليمة وفق الإعراب ولا معنى لها . هل يمكن للقواعد أن تمنع ربط بعض الصفات ببعض الأسماء أو بعض الأسماء ببعض الأفعال وغير ذلك ؟ فوفق خيار ما تكون التراكيب سليمة وفق الإعراب وعديمة المعنى ، وفي خيار آخر تصبح غير صحيحة من وجهة نظر الإعراب إلا أنها تؤدي معنى مفيدا .

وهكذا وضع شومسكي مخططا لقواعد اللغة الإنكليزية يتضمن عند كل تفرع في عملية إنشاء الجملة خطى إجبارية وأخرى اختيارية . لا يمكن تنفيذ مثل هذه الخطى باستخدام الآلة المتناهية الحالات ، إلا أنه باستطاعة آلة أخرى فعل ذلك ، تعرف هذه الآلة بآلة تيورينغ وهي آلة منتهية الحالات أضيف إليها شريط تسجيل يمكن قراءة الرموز وكتابتها عليه ، وكذلك محيها . تشكل العلاقة بين قواعد شومسكي وهذه الآلة مادة للدراسة في علم معاصر يعرف باسم الأتمتة .

يجدر بنا ان نلاحظ أننا إذا فرضنا حداً أعلى لطول الجملة بالنفا ما بلغ من الكبر ، كان نجله مساوياً لآلف أو مليون كلمة ؛ فإن قواعد شومسكي ستبقى متناسبة مع الآلة المنتهية الحالات . ان فرض حد أعلى لطول الجمل يبدو معقولاً من الناحية العملية .

بعد أن يتم وضع مخطط عام أو نموذج لقواعد كذلك الذي اقترحه شومسكي ، يبرز السؤال الهام : كيف يمكن تقدير الانتروبي وتحت أي ظروف ، تلك الانتروبي التي تقيس الخيار أو الرتبة لمصدر رسائل يولد النصوص اللغوية وفق احكام القواعد المعتمدة . يخص هذا السؤال الرياضي الحاذق العامل في مجال نظرية المعلومات .

لعله امر بالغ الاهمية ان نصيغ احكاماً للقواعد معقولة وقابلة للعمل وفقها يمكن ان تكون تلك الاحكام ما اقترحه شومسكي تحت اسم : قواعد الانشاء باستخدام أجزاء الجمل ، أو يمكن ان تكون متضمنة في اقتراحات مناسبة أخرى . يحتمل ان تكون تلك القواعد غير كاملة إذا هي فشلت بانتاج أو تحليل التراكيب الواردة والمقبولة وفق القواعد اللغوية المعروفة ومما هو أكثر أهمية ان عمل هذه الاحكام يجب ان يتناسب مع الانشاء اللغوي الذي ينجزه كائن بشري ، وان يكون بسيطاً للدرجة يمكن معها للكمبيوتر ان يقوم بتوليد وتحليل النصوص . اعتقد ان استخدام الكمبيوتر ضروري في تناول مشاكل النصوص اللغوية سواء من حيث انشائها أو مواصفاتها الاحصائية .

يتناقض الدارسون في مواقفهم من انجازات شومسكي ، فبعضهم يرى فيها الجانب الأهم من قواعد اللغة الانكليزية بينما يشعر الآخرون ان طريقتهم في توليد الجمل يجب ان تمثل أو ربما تحدد فيما اذا تم التخطيط لاستخدامها في التوليد الفعلي للجمل المنتجة من قبل بني البشر يفهم الإنسان شعور قوي ، لدى استماعه الى متحدث آخر أو قيامه بالحدث هو نفسه ، بان الجمل تنبثق بشكل متماسك من البداية وحتى النهاية ، وأكثر من ذلك فان لدى كل منا الانطباع بان كائناً بشرياً من كان

لا ينتج جملة بتطبيق آلية جاهزة في دماغه لدى تفوهه او كتابته كل كلمة ،
وعوضاً عن ذلك يتعامل مع تلك الآلية بشكل عفوي وعبر سياق انتاجه
للتصوص اللغوية .

لا اعتقد ان الدراسات المنصبة على اللغة والقواعد والاحصائيات
المتعلقة بهما ستعطينا في المستقبل القريب معلومات جديدة عن طبيعة
اللغة والانسان . واذا رغبت بقول ما هو اكثر خصوصية من ذلك ،
فعلي تجاوز المعارف الحالية ، سواء اكانت معارف او معارف الآخرين .

لا يقتصر عمل القواعد على بسط الاحكام النظمية لعملية ضم الكلمات
الى بعضها بهدف تكوين جمل مفيدة ، بل يتعدى ذلك الى تصنيف
الكلمات . في زمر مختلفة وفقاً للامكان التي يمكن ان تظهر . عندها في
النصوص المنشأة على اساس تلك القواعد يمد اللغويون مثل هذا
التصنيف استناداً الى القواعد الصرفية ودون استخدام مفهوم معنى .
وهكذا فكل ما نتوقه من القواعد بناء جمل صحيحة من حيث الشكل ،
وهذا يشمل الجملة التالية مثلاً : نزل المطر على الارض باستخدام المصدر
ان تضيف الكلمات وفق القواعد الى اصنافه مختلفة مثل الاسماء ،
المصفات ، والافعال ، ليس اطلاقاً دليلنا الوحيد لانشاء النصوص
اللغوية .

ماذا يحكم اختيار الكلمات عند انشاء جمل سليمة وفق القواعد ،
ولا نقصد هنا الانشاء المنفذ من قبل آلة ، بل ذاك المنطوق بكائن بشري ،
والذي تعلم من خلال خبرته الطويلة الكتابة والحديث وفق اصول
القواعد . لا يمكن الاجابة عن هذا السؤال بالجوء الى مفهوم المعنى دون
تمحيص كاف ، اذ ان المعايير المستخدمة في انشاء النصوص اللغوية هي
معايير مقدمة للغاية . لقد درس الفلاسفة وعلماء النفس استخدام
الكلمات واللغات لاجيال متعاقبة واقاموا حولها النظريات ، ولكن يبدو
ان استنتاج اي مقولة جديدة في هذا المجال هو امر صعب ناهيك عن
امكانية ان تكون تلك المقولة صحيحة على الاطلاق . نجد في كتابات
الاسقف بركلي من القرن الثامن عشر المتطابقة باستخدام اللغة آراء مقولة

يصعب على الباحث تقديم آراء جديدة دون العودة إليها وإيفائها حقها
كأساس في أبحاث اللغة .

يجد الشاعر الاصيل صعوبة بالغة في نظم شعره ، فعليه من جهة
انتقاء الكلمات ذات الجرس الموسيقي القبول والتي تؤدي المعاني المطلوبة .
الى جانب حفاظها على الوزن والقافية المعتمدين . لذا لا يمكن ان نقيم
كلل الأشعر وفي نفس السوية فمنها ما يحقق الإيقاع المطلوب الى جانب
الوزن والقافية ، بينما يخلو في نفس الوقت من أي معنى .

ان انتقاء الكلمات ذات الجرس الموسيقي يتجاوز الشعر الى انواع
الكتابات الأخرى ، خاصة اذا قصد الكاتب التأثير بشكل ما على القارئ ،
وقد يعمد بعض الكتاب لاستخدام كلمات معينة ، بنية تحقيق هذا
الهدف كالخوف والحدق والحب وغيرها . تحرك كلمات مختلفة مشاعر
كل منا في ظروف متباينة ، ويتمدى فعل الكلمات في بعض الثقافات
الأفراد الى المجموع ، اذ تؤثر فيهم جمل ومقاطع محددة ، تماما كما
تؤثر فيهم أحداث متكررة أو أصوات أو مشاهد ذات مغزى .

لم يذكر بركلي نوعاً معيناً من الانفعال هو الانفصال المرتبط بالفهم
وعملية المعرفة . ان تفوهنا بنماذج دارجة ومتعارف عليها من الكلمات
في معرض مواجهتنا لبعض القضايا الغير واضحة ، يمكننا من ربط
انفعالاتنا الاليفة النافذة مع ارتباطنا وحيرتنا ازاء الحياة ، التاريخ ،
طبيعة المعرفة ، الومي والموت واضح ان هذه الفلسفة تعتمد الكلمات
المتداولة لذا فان تقييمها يجب ان يستند الى اهمية مصداقية الشاعر
الانسانية باكثر مما تستند الى مفهوم المعنى في اللغة .

يمكن ان يقضي احداً ايما بكاملها في تفحص امثلة عن دوافع انتقاء
الكلمات ، الا انه سيهود الى مشكلة المعنى على الدوام ، فكل شيء يبدو
ضائماً بدون المعنى مهما كان ذلك المعنى لا يملك الشعر الصيني أو النكتة
الصينية الا اثراً ضئيلاً علي الا اذا كان بإمكاننا ان اتفهم اللغة الصينية
بنفس الطريقة والالية اللتين يتعامل الصينيين بهما مع لغته .

اعتقد أنه من المناسب أن نعتبر اللغة نوعاً من رموز الاتصال على الرغم من اعتراض كولين شيري ، وهو باحث في نظرية المعلومات ، إلا أن ذلك لا يعني أن اللغة هي نظام رموز سهل يتم وفقه وببساطة استبدال الفعل بالكلمة ، أنها أشبه بأساليب الترميز القديمة حيث كانت تعتمد قائمة من الكلمات تصلح كل منها لترميز كلمة معينة أو حرف محدد (وذلك لمنع التكرار) مرة أخرى ليست اللغة ببساطة هذه الأساليب ، فقوائمها تتداخل بعكس أساليب الترميز القديمة ، كما أن القاموس اللغوي لأي شخص يختلف عن القاموس اللغوي لأي شخص آخر ، مما يزيد في الارتباك والتشوش إذا اعتبرنا أن اللغة هي نظام ترميز غير كامل ، فعلينا أن نزود المعنى في نهاية المطاف إلى الشخص ، ولهذا السبب ، ربما أن بعضنا يطرح السؤال التالي : ماذا تعني ، على الرغم من سماعه كلام الشخص الآخر بوضوح . يسمى الدارسون في هذا السياق ، لفهم مقاصد كتاب الذين قضوا منذ وقت طويل ، كما تسمى المحاكم لاستيعاب مقاصد الجهة المشرعة قبل استخدام النصوص القانونية .

لنفرض جدلاً أنني اقتنعت بكلب أحد الأشخاص عندها أحمل كلماته معان يحاول من خلالها تملقي أو خداعي . بينما إذا اكتشفت أن الكمبيوتر استطاع صياغة جملة مفيدة استنتج على الفور أن الكمبيوتر يعمل بشكل جيد .

لا اظن أن مناقشتنا هذه هي من قبيل المحاكمة ، إذ أن ما يدفعنا إلى هذه الاعتبارات عن المعنى ، افتراضنا الأولي بأن اللغة هي جملة ترميز للاتصالات غير كاملة ، وتستخدم في بعض الأحيان بشكل غير نسيق . أما الأمر الأكيد ، فهو أننا ما زلنا بعيدين جداً عن الإحاطة الكاملة بهذه القضايا .

وعلى كل حال ، تمتلك الجمل السليمة وفق الأعراب معنى شكلياً بصرف النظر عن النية أو القصد . وإذا كان في حوزتنا نظام أعراب مرض فيمكن للآلة استخدامه ليعلن العلاقات بين مكونات الجملة كالفعل والفاعل

وغيرها ، أما المرحلة التالية فتتركز في البحث عن المعنى الشكلي للجملة ،
ويعني ذلك ربط مختلف الكلمات بالأشياء على تنوعها والخصائص
والأعمال أو العلاقات في العالم من حولنا ، بما في ذلك المجتمع الانساني
ونظام معرفته .

لا نجد أي صعوبة من خلال سياق الاتصالات عبر حياتنا اليومية ،
في ربط الكلمات المستعملة بالأشياء والخصائص والأعمال والعلاقات ،
مثلا لا يمكن لاحد ان يشتكي من غموض جملة تنطوي على طلب اغلاق
النافذة كقولنا : اغلق النافذة الشمالية ، او جملة أخرى تثبت حقيقة
معروفة مثل : الملك لويس ميت . ان هاتين الجملتين بسيطتان
فعلا وتتعلقان بمواضيع بسيطة من المحيط ، فجميعنا نعلم ما معنى
نافذة واين هي جهة الشمال ، كذلك لا يحتاج الامر معرفة معمقة بالتاريخ
بنية الحديث عن موت الملك لويس ، فكل منا قد سمع بحادث موت او
شاهده ، أما عن الملك لويس فهناك عدد كبير من الملوك بهذا الاسم .
تبقى هنا قضية إجرائية بحثية ، إذ قد لا نسمع الجملة أو ندرك جيدا
للوهلة الأولى ، فيطلب السامع ببساطة املاها .

ولكن ماذا لو تصورنا الانسان الاول : انسان الكهوف وهو يواجه
طلبا كهذا : اغلق النافذة الشمالية ، لا شك سيكون في حيرة من امره ،
تماما كحالنا الآن ازاء التساؤل الكبير : هل الفيرسات حية او ميتة .

يبدو ان معظم الارتباك والحيرة المتسبب عن محاولة ربط الكلمات
بمكونات العالم قد نشأ من محاولات الفلاسفة بدءا من افلاطون وحتى
لوك التي انصبحت على البحث عن المعاني المقابلة لأفكار مثل : نافذة ،
قطعة ، او ميت ، وتركز ذلك البحث على ربط تلك الأفكار بأفكار أخرى
أكثر عمومية او بأمثال نموذجية . يفترض فينا وفق ذلك ، ان نميز
النافذة بمشابهتها لفكرة عامة عن النافذة : لنافذة نموذجية في الواقع ،
وان القطعة كذلك بمقارنتها مع قطعة نموذجية تنطوي على كل ميزات
« القطعية » . يشير بركلي الى أن الفكرة المجردة عن المثلث أو المثلث

المثال يجب في نفس الوقت ألا يكون حاداً أو قائماً أو متساوي الاضلاع أو متساوي الساقين ، انه كل هذه الاشياء وليس أحداً في نفس الوقت .

عندما يعلن الطبيب موت أحد الأشخاص فإنه إنما يفعل ذلك استناداً لبعض المؤشرات الظاهرة التي لا يجدها في الفيروس . وأكثر من ذلك ، فعندما يشخص الطبيب مرضاً ما ، لا ينطلق في عمله من مقارنة حالة المريض مع صورة نموذجية للمرض . ان ما يتناوله الطبيب لدى مواجهته المريض هو المظهر العام للمريض ، إضافة لتفاصيل أخرى كدرجة الحرارة والنبض ولون الجلد والتهاب الحلق وغيرها ، كذلك يأخذ الطبيب بعين الاعتبار بعض العلامات التي قد يلتفت المريض نظره إليها . ترتبط بعض الأعراض والتظاهرات بمرض معين ، كما تفضي التحاليل المخبرية والدراسات المفصلة الأخرى إلى المفاضلة بين الأمراض التي تشترك في أعراض متشابهة .

يحدد عالم النبات ، وبشكل مماثل ، صنف معين من النباتات ، سواء كان معروفاً أم لا وفق قائمة من الموصفات قد يتواجد بعضها بينما يكون البعض الآخر غائباً ، كال حجم واللون ومساحة الأوراق وتوضعها وغير ذلك . تلعب بعض الموصفات دوراً حاسماً في التفريق بين النباتات ، مثلاً خصائص أوراق النباتات ذات الفلقة وخصائص أوراق النباتات ذات الفلقتين ، بينما لا يكون لبعض الموصفات الأخرى ، كحجم الورقة مثلاً ، إلا دوراً موحهاً وحسب . يخرج التحليل النهائي بالباحث وقد كون قناعة أنه كان على حق ، أو على الأقل أنه على استعداد للاقتناع أنه كان على حق ،؛ وأخيراً يمكن أن يكون النبات وبساطة من صنف جديد .

وهكذا يوضح النشاط اليومي للطبيب وعلم النبات فيسبب المرض النموذجي أو النبتة المثالية بالمقارنة مع المعايير النفعية الواقعية . وبدلاً من ذلك ، تتوفر قوائم من الموصفات ، لبعضها امكانية التقرير ، وبعضها الآخر صفة التوجيه وحسب .

تمزت أهمية هذه الملاحظة وبشكل قوي من خلال العمل الجاري حالياً لعمل الآلة على تنفيذ مهمات التمييز والتصنيف . لقد أخطأ الباحثون الأوائل باتباعهم آراء بعض الفلاسفة فحاولوا تطبيق فكرة مقارنة الحرف مع حرف نموذج أو المخطط الموجي للصوت ، مع مخطط موجي مثال ، وكانت النتائج مروعة . فقد تم تصميم آلة للمقارنة أسميت أودري كانت مملوءة بالذكريات ومخازن المعلومات ، واستطاعت تمييز الأرقام المنطوقة بأصوات مختلفة ، إلا أن أخطائها كانت كبيرة جداً . نستنتج بذلك أن الدماغ الإنساني لا يعمل وفق طريقة المقارنة مع النماذج إلا في حالات بسيطة محدودة ، ناهيك عن احتمال أن عمله قد لا يكون بهذه الطريقة إطلاقاً .

يقوم الباحثون الأكثر تقدماً في ميدان الإدراك بدراسة الزوايا الرئيسية والنقاط البارزة ، وكمثال على ذلك نعتبر الحرف ن فنصفه يكون نصف دائرة دون زوايا أو تضخيمات في الانحناء ، تملؤها نقطة .

بنى ل. د. هارمون عام ١٩٥٩ في مخابر بيل جهازاً بسيطاً يزن عدة كيلو غرامات كان بإمكانه التمييز بين الأرقام العشرية . ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ إذا كتبت ليس بالرموز وإنما بالكلمات وبخط واضح لم يكن ذلك الجهاز ليقارن الكتابة بنماذج مثالية ، بل كان يصيغ استنتاجاته اعتماداً على ملاحظات محددة : كم مرة ارتفع القلم وهبط عبر خطوط معينة أثناء الكتابة ، هل هناك نقاط ، وخلاف ذلك .

لا يشك أحد إطلاقاً أن الكلمات تشير إلى صنوف من الأشياء والأفعال وغيرها . يحيط بنا ويتداخل في حياتنا أصناف كثيرة من الأشياء والأفعال نربط بها عادة كلمات معينة . تتضمن هذه الأصناف أشياء مثل (الزهور ، دوار القمر ، الفاصولياء) ، وحيوانات مثل (القطط ، الكلاب) والآلات مثل (السيارات ، الراديو) ، ومنشآت مثل (الجراج ، أبنية) وألبسة مثل (قمصان ، بيجامات) وهكذا . كما تتضمن أفعالا معقدة مثل لبس وخلع الثياب (يحاول شاردي الدهن ، بما فيه من مؤلف هذا الكتاب ،

اثبت أنهم يستطيعون القيام بهذه الاعمال بشكل لاواعي) وايضاً شد اربطة الاحذية : (ويتميز هذا الفعل بصعوبة تنفيذه من قبل الاطفال) ، الى جانب الطعام ، قيادة السيارة ، القراءة ، الكتابة ، جمع الاعداد ، لعب كرة القدم أو كرة اليد (وهي افعال تنطوي على مهارات جزئية) ، واخيراً الاستماع الى الموسيقى وغيرها وغيرها

اميل الى الاعتقاد بأن ما يحدد صنفاً معيناً من الاشياء ليس النموذج أو المثال ، بل قائمة من المميزات ، وهذا ينطبق على الافعال والعلاقات . لا نتوقع أن مثل هذه القوائم ستتمكننا من تجزئة خبراتنا في زمر مغلقة منفصلة . بينما نجد مثل تلك الامكانية في لغة العلم سيما عندما نتناول قطاعاً ضيقاً من الخبرة ، إلا أن خبرة الحياة اليومية تتجاوز مثل هذا الوضع ، فتقسم الخبرة فيها أمر مستحيل إلا إذا كانت للأقسام الناتجة غير شاملة وكذلك متداخلة وغير منفصلة . اعتقد على الرغم من ذلك أنه بواسطة قوائم المميزات يمكننا تعريف الأبواب ، التوافد ، القطط ، القروذ ، واشياء الحياة اليومية الأخرى . كما اميل الى الاعتقاد أن نفس الاسلوب سيمكننا من تحديد الافعال المألوفة كالركض والقفز ، وكذلك الرموز المستخدمة في الكتابة والكلام أي الكلمات .

وهكذا الخص وجهة نظري بالتأكيد على أن مثل هذا التناول قد يحقق آمالنا بجعل الآلة قادرة على تصنيف الاشياء والافعال بدلالة اللغة ، أو تمييز وتفسير اللغة بدلالة فعل ما أو لغة أخرى . واعتقد أكثر من ذلك أن الكلمات التي ليس لها قائمة ميزات محددة ذات جذور واضحة في خبرات الحياة اليومية ، مثل تلك الكلمة يجب أن نقف معها موقف الحذر .

إذا دفعنا طموحنا لفهم اللغة بطريقة تمكننا من جعل الآلة قابلة للتعامل مع اللغة بنجاح كامل ، فعلينا أن نبحث عن قواعد واضحة للغة ، كما أن علينا اكتشاف العلاقات التفصيلية التي تربط الكلمات بالعالم من حولنا ، إلا أن ذلك كله ليس كافياً . إذا أردنا التعامل مع

الجميل على أنها مؤدية لمعان معينة ، فيجب أن نبحث من تلك المعاني في الواقع ، بكلمة أخرى ان على هذه الجملة ان تترجم بصدق الحياة كما نعيشها .

لا تقدم الحياة اشياء جديدة وافعال جديدة في كل يوم ، اذا ان الجديد ، في واقع الامر ، يصنع من الاشياء المتتادة والافعال المألوفة ولكن في سلاسل أكثر تعقيداً ووفق تراكيب مختلفة وزمر متباينة . نحقق عملية التعلم في بعض الاحيان باضافة اشياء أو أفعال أو تراكيب من الاشياء والافعال الى جملة خبراتنا ، وهكذا نفني أو نغير حياتنا . وقد ننسى الاشياء والافعال في احيان أخرى .

تتوقف أفعالنا الخاصة على الاشياء والاحداث من حولنا . نتفادى سيرة في الطريق (هنا نميز سلسلة من الافعال المعقدة) . عندما نعطس ، نتوجه الى أقرب مصدر مائي ونشرب (سلسلة آخر ولكن متواتر من الافعال المعقدة) . واذا تواجدنا في منطقة مكتظة فلربما قد ندفع الآخرين بالكثف كما فعلنا سابقاً . الا ان مصادرنا المعلوماتية لا تقتصر على الخبرة المباشرة ، وكذلك فتأثرنا على الآخرين لا يحد بالدفع والمزاحمة ، اذا اننا نمتلك أداة قوية لتحقيق أهدافنا : اللغة والكلمات .

نستخدم الكلمات لتتلم العلاقات بين الاشياء والافعال ولنتذكرها ، وكذلك لاصدار التعليمات للآخرين وتلقي التعليمات منهم ، واخيراً للتأثير على من حولنا بشكل أو بآخر . تتوقف فعالية الكلمات على التطبيق بين أسلوب فهم السامع لها وقصد قائلها ، أي على قابلية السامع لربط الكلمات مع نفس الاشياء والمهارات . اما اذا طلبنا من شخص ما القراءة أو جمع الاعداد ، في الوقت الذي لم يسبق لهذا الشخص ان مارس القراءة أو الجمع ، أي انه لم يسبق له ان اكتسب هذه المهارات ، فان طلبنا باختصار سيكون عديم الفائدة . وبالمثل سيكون مضيعاً للوقت والجهد ان نطلب من شخص آخر صيد الروبوت بواسطة التيتاندب ، اذا هو لم ير هذين الشيئين سابقاً .

وأكثر من ذلك ، فلكي تؤدي الكلمات فائدة لمستخدميها ، يجب أن تشير الى سلسلة واقعية أو ممكنة من الافعال . وهكذا سيبدو من غير المفيد أن ننصح شخصاً ما بالسير من لندن الى نيويورك بعد الظهر فور انتهائه من تناول وجبة السابعة السابعة .

وهكذا لا يقتصر أداء اللغة للمعاني على سلامة القواعد وعلى مقابلة الكلمات للاشياء والافعال وغيرها ، بل يعتمد أيضاً على تركيب العالم من حولنا . تضمننا هذه الحقيقة في مواجهة صعوبة بالغة اذا حاولنا ترجمة نص من لغة الى لغة اخرى وتصورنا أن بمقدورنا الحفاظ على جوهر المعنى الوارد في النص المترجم .

إن أحد أهم عناصر هذه الصعوبة هو الاختلافات في التصنيف ، فمثلاً يمكن الناطق بالانكليزية من استخدام كلمة القدم ، أو مصطلح الرجل السفلى ، بينما لا يرد في اللغة الروسية إلا كلمة واحدة بالمقابل . يملك الهنغاريون عشرين اسماً ، أو أن الكلمة لديهم هي نفسها لأي شيء ملحق . إذا تحدث أي منا عن الكلاب ، فهو يعني الكلب ذكراً كان أم أنثى ، بينما كان الاقدمون أكثر حرصاً على التمييز بين الكلب والكلبة . يقال أن شعوب الاسكيمو تميز بين أنواع من الثلج ، وإذا رغبتنا بفهم مقاصدهم ، فعلينا تعديل لغاتنا بما يستوعب صفات الأنواع المختلفة من الثلج ، إلا أن هذه الصفات ستكون ذات أهمية ضئيلة بالنسبة لنا ، لأن تصنيف الثلج لم يبرز كقضية هامة في حياتنا . وهكذا فأجزاء العالم المشتركة بين ناطقي اللغات المختلفة والتي تحمل لهم المعاني على السواء ، تقسم الى زمر متباينة وفق الناطقين بكل لغة . تستحيل الكتابة باستخدام لغات مختلفة لكلمات أو جمل بسيطة تقابل نفس المجال من الخبرة .

وتبقى بعد ذلك مشكلة أكثر عمقا ، إذ أن الكلمات المأخوذة من لغات مختلفة والمقابلة لنفس الخبرة لا تغطي نفس المساحة من الخبرة . كيف يمكن أن ينقل المترجم الجملة التالية : ربط شريط الطلاء ، الى لغة

قوم يستخدمون احادية بدون شرائط . لن تحل المشكلة بتوصيف معتد من جانب المترجم . لربما يكون هناك معادل ثقافي في اللغة الاخرى . كيف يمكن أن نوفق بين ما قد نصادفه في قصة قديمة تروي عن شخص ما أنه بنى بيتا ، فوق الكئاب منى ذلك الحفر والتقر في شجرة كبيرة ، او كتلة صخرية صلبة ، بينما يعني بناء البيت في عصرنا استخدام المهندس والبناء والحديد والأسمنت وغيرها .

على أنه من المرجح أن تكون الترجمة بين لغتين متقاربتين ناجحة بقدر ما اذا جرت تلك الترجمة على أساس مقابلة الكلمات او مقاطع الجمل ، وان كانت بعض هذه المحاولات قد أدت الى ترجمة مقطع مثل: ابعد من النظر ووراء حدود العقل الى المقطع التالي : ابله أعمى . أما اذا كانت الفرق بين الثقافات واللغات كبيرة فإن المترجم يفكر أولا بمعنى الكلمات وفق الاشياء والانفعالات ثم يحاول إعادة كتابة هذه المعاني باللغة الاخرى . ومن الممكن أن الثقافة المرتبطة باللغة الاخرى هذه لا تنطوي على مكافئات قريبة للاشياء او الافعال الواردة في النص الاصلي، عندها يجد المترجم نفسه أمام حائط مسدود .

بالضخامة المشاكل التي سيواجهها من يحلول بناء آلة للترجمة . انه لن يستطيع تحقيق مراميه دون تأهيل الآلة بشكل ما للتعامل مع ما اشرنا اليه سابقاً على أنه الفهم . لا يقتصر دور الفهم في مجال الترجمة من لغة لاخرى . ان كاتب السيناريو الذي يستطيع وبامانة ترجمة ونقل أساسيات مشهد موت عمة في أوسك الى مشهد موت اب في لوس انجلوس ، سيفشل بشكل متكرر اذا هو حاول إعادة صياغة جملة علمية ، ببساطة لان يعرف الكثير عن الحزن والقليل عن العلم .

نواجه الآن كلمة الفهم ، بعد ان علقنا لفترة وبشكل مؤلم مع كلمة المعنى . يبدو لكلمة الفهم معنيان . اذا فهنا الجبر أو علم التفاضل والتكامل ، فنستطيع استخدام تقنيتهما في حل مسائل لم نواجهها سابقاً وبرهان نظريات لم يسبق أن برهنت . يتجلى الفهم هنا بقوة

الفعل والخلق وليس مجرد التكرار . يمكن أن نقول في هذا المعرض أن الكمبيوتر يستطيع الفهم إلى حد ما ، إذ أن باستطاعته برهان بعض النظريات في المنطق الرياضي إذا تمت برمجته لهذه الغاية . إلا أن هناك جانباً انفعالياً للفهم إذا استطعنا برهان نظرية ما بطرق متعددة وضمناها إلى غيرها من الحقائق والنظريات بهدف التنسيق ، كذلك إذا تناولنا موضوعاً ما من مناهج مختلفة بنية اكتشاف علاقة طرق التناول المختلفة هذه مع بعضها ، قلنا في كل الأحوال أننا نتفهم القضية بعمق ، وغمرنا شعور عميق وحار بإمكان تعاملنا معها . لربما شعر بعضنا بهذه الحرارة في أحيان متفرقة دون أن تتظاهر القابلية لديهم ، إذ اتضح لدى الاختبار زيف دافئ المشاعر التي غمرتهم للحظات .

قادنا تناول اللغة من منظور نظرية المعلومات إلى معارج مختلفة من أمواج الكلمات حيث واجهنا أحكام القواعد غير الكاملة واقتحمنا مجاهل المعنى والفهم . يظهر كل ذلك المدى الواسع الذي قد يندفع المرء فيه بسبب الجهل . سنظهر بمظهر مضحك فعلاً ، إذا حاولنا التأكيد على أن نظرية المعلومات أو أي شيء آخر قد مكتننا من حل مشاكل اللغويات ، المعنى ، الفهم ، وفلسفة الحياة . وما يمكننا قوله في أحسن الأحوال أننا نندفع قليلاً أبعد من القيود الميكانيكية للغة في محاولة كشف الخيارات التي تسمح بها اللغة . أن ذلك يلفت الانتباه إلى مسائل تتعلق باستخدام ووظيفة اللغة ، إلا أنه لا يبرهنها . وأخيراً فربما يفضل القارئ مشاركتي جهلي المقدم مجاناً فيما يتعلق بهذه الأمور أو لعله يود الاستمتاع بجهله الخاص .



الفصل السابع

الترميز والفعال

إن نستطيع ممارسة فهم الطبيعة مرة أخرى كما فهمها قدماء اليونان . إذ أن التفسير العام للظواهر المألوفة من خلال عدد قليل من المبادئ الشاملة لم يعد مرضياً البتة . اننا نعلم اليوم الكثير ويجب أن نفسر الكثير مما فات قدماء اليونان . كما يجب أن نحرم على ملائمة نظرياتنا للمجال الواسع من الظواهر التي حلولوا تفسيرها . تؤكد أنهم زودونا بدليل عمل مفيد وليس بأسلوب عقلنة العالم . تتجلى عظمة ميكانيك نيوتن في أنها مكنت من التنبؤ بمواقع الكواكب والأقمار الصناعية وكذلك من فهم مجموعة من ظواهر الطبيعة الأخرى . نحن أكيدون أن ميكانيك نيوتن لم يكن السبب في تحريك ودعم الفهم الميكانيكي للحياة والكون .

يشعر الفيزيائيون المعاصرون أنهم راضون تملأ عن اعتقادهم المتضمن إمكان تفسير كل خواص المادة (عدا النووية منها) بواسطة قوانين الميكانيك الكوانتي ، بما فيها الخواص الفيزيائية ، الكيميائية ، والحيوية ، وذلك باستخدام فرض بسيط ينص على وجود الإلكترونات وعدة أنواع من نوى الذرات . إلا أن ما يحير ويربك فعلاً أن الجملة الفيزيائية الوحيدة التي حسب خواصها ودرست بشكل كامل هي ذرة الهليروجين المنتملة .

يستطيع الفيزيائيون تفسير ظواهر فيزيائية أخرى بدقة بالغة والتنبؤ بها ، كما يستطيعون تناول ظواهر فيزيائية مختلفة بطرق نصف حسابية . إلا أن تناول النظري الدقيق دون العودة الى المعلومات التجريبية ما زال قاصراً بالنسبة لمجموعة من الظواهر الحرارية ، الميكانيكية ، الكهربائية ، والكيميائية وعماد هذا تناول النظري هو كما ذكرنا الميكانيك الكوانتي المطبق بشكل رئيسي على النوى والالكترونات . إن تتبع العمليات البيولوجية المعقدة حتى أصولها في المبادئ الكوانتية يبدو أمراً بالغ الصعوبة لدرجة يبدو معها الميكانيك الكوانتي قليل الأهمية بالنسبة للبيولوجيا . ويبدو الأمر كما لو أننا وضعنا اليد على فرضيات قطاع هام من الرياضيات ولم نستطع إلا برهان بعض النظريات البسيطة .

وهكذا يحيط بنا في العالم جملة معقدة من الظواهر والمشاكل تتجاوز آماننا بإمكان احاطتها بنظرية شاملة واحدة منها كانت تلك النظرية صحيحة من حيث المبدأ . لقد ظلت مشاكل العلم التي نربطها عادة بالفيزياء هي الأكثر إثارة وتحريكا حتى وقتنا هذا بالمقارنة مع جوانب الطبيعة الأخرى التي ما زالت تحيرنا ، وإن كان قد دخل مؤخراً حلبة الاهتمام علمان جديداً : الكيمياء الحيوية وعلم وظائف الأعضاء .

اعتقد ، على كل حال ، أن المشاكل التي يطرحها التطور التكنولوجي المعاصر لا تقل تحدياً عن تلك التي نواجهها في الطبيعة . ما الذي يمكن أن يكون أكثر إثارة من محاولتنا كشف إمكانات الكمبيوتر في برهان النظريات أو في محاكاة أنماط من السلوك تعودنا على وصفها بالإنسانية . لا تقل تحدياً مشاكل الاتصالات الكهربائية . لقد أوت القياسات الدقيقة بوسائط كهربائية الى إحداث ثورة في فيزياء الصوتيات . كما افتتحت للتراسة المرتبطة بالاتصالات الهاتفية عهداً جديداً في دراسة السمع والمخاطبة إذ تبين أن الأفكار السلفية المتعلقة باللغويات غير كافية . هذا هو حقل دراسات نظرية الاتصالات حيث تتلاطم عشوائيا الجوانب الكثيرة للجهل الجديد والقلة الشحيحة المتوفرة من المعلومات .

إذا كان على نظرية الاتصالات ان تؤخذ على محمل الجد ، كما هي الحال مع قوانين نيوتن ، فعلى هذه النظرية ان تقدم لنا دليلاً جيداً فيما يتعلق بمشاكل نظرية الاتصالات ، ويجب ان تبرهن كذلك ان فيها مادة حقيقية ومستمرة تتجسد في بلوغ مستويات عالية من الفهم والقوة . وكما هو متوقع فإن البحث عن هذه المادة انما يجب ان يتم في مجال الإرسال الدقيق والفعال للمعلومات . إن هذه المادة موجودة فعلاً ، وكما رأينا فقد وجدت فعلاً وبشكل غير مفهوم بالكامل حتى قبل ان يوجد لها عمل شائون ويجعلها سهلة الإدراك .

نحتاج فهماً أساسياً وجديداً لتبصرة موضوع الإرسال الدقيق للمعلومات ، وهذا سيكون موضوع الفصل القادم . إلا ان الفصول السابقة قد وضعتنا في موقع يمكننا من شرح بعض جوانب الإرسال الفعال للمعلومات .

وجدنا ان انتروبي مصدر المعلومات مقدرة بالبيت لكل رمز او لكل ثنائية تعطينا قياساً لعدد الأرقام الثنائية ، لعدد نبضات القطع والوصل لكل رمز او لكل ثنائية ، الضرورية لبث رسالة . نحتاج بعد معرفة عدد الأرقام الثنائية الضرورية للترميز والإرسال ، لاكتشاف طريقة عملية للترميز لا تستخدم من الأرقام الثنائية وفي أسوأ الأحوال إلا ما يزيد قليلاً عن هذا العدد الأصغري .

تقضي المستجدات في الرياضيات ، العلم ، او الهندسة ، وعلى الدوام بالبحث عن طرائق ميكانيكية شاملة لحل المسائل . تنبع أهمية هذه الطرائق من انها تبرهن على إمكانية حل المشاكل ، إلا انها لا تبين عملية في حالة القضايا المعقدة ، كما انها تكون غير مجدية إطلاقاً في بعض الأحيان . ونضرب مثلاً على ذلك توفر الحل الرياضي الدقيق لمعادلة الدرجة الثالثة ، إلا ان أحداً ما لا يستخدمه في حالة المسائل العملية : ويستخدم عوضاً عنه طريقة تقريبية مناسبة للمساواة الطروحة .

إن الشخص غير المبتدئ يفكر طويلاً في مسألة معينة له بجد طريقة لتناولها أفضل من مجرد التطبيق الآلي لما تعلمه . لنرى الآن كيفية تطبيق ذلك على نظرية المعلومات ونعتبر أولاً حالة مصدر متقطع يولد سلسلة من الرموز أو الأحرف .

رأينا في الفصل الخامس كيفية حساب الإنتروبي المصدر باختلاف الاحتمالات النسبية لورود تراكيب الأحرف المختلفة . كلما ازداد طول التراكيب تقترب القيمة المحسوبة من الإنتروبي الحقيقية أكثر وأكثر . ويختلف الدقة المطلوبة حسب الحالة الخاصة المعتبرة ، فقد يشكل التراكيب المكون من ٥ أو ١٠ أحرف أو ربما ١٠٠ حرف التقريب المطلوب للإنتروبي .

رأينا أيضاً أن تجزئة الرسالة في تراكيب متتالية من الأحرف لكل تراكيب منها احتمال وريود خاص به ، ومن ثم استخدام طريقة هوفمان في ترميز هذه التراكيب بلرقام ثنائية ، نقول ، أن هذه التجزئة وما تبعها أدت إلى قيمة معينة لعدد الأرقام المخصصة لكل حرف وأن تلك القيمة اقترنت من الإنتروبي أكثر بلقدياد عدد الأحرف المساهمة في تشكيل التراكيب .

هذا هو نوحجنا الميكانيكي السهل ، فلماذا لا نستخدمه ببساطة في كل الحالات ؟

نطرح الحالة البسيطة التالية ، بهدف تبين أحد الأسباب . نفرض أن مصدر رسائل معين يولد الرمز . أو الرمز ١ ولاحتمالين متكافئين ثم يكرر الرمز المولد مرتين قبل أن يعود مرة أخرى إلى الخيل بين الرمزتين ، وهكذا تبدو الرسالة المولدة من قبل هذا المصدر على الشكل :

١١١ ٠٠٠ ١١١ ١١١ ٠٠٠ ١١١ ٠٠٠ ١١١ ٠٠٠ ١١١

إذا تقدمنا بألية ميكانيكية في عملية ترميزنا للنصوص الانكليزية بشكل أكثر كفاءة ، لقمنا بترميز ازواج الأحرف ثم تراكيبها الثلاثية ، وهكذا . إلا أن هذه الطريقة ستفضي الى ترميز عدد كبير من النصوص ، هي في واقع الأمر ليست نصوصاً لغوية مقبولة ، وهذا يدفعنا الى اعتبار التركيب الأعلى للغة : الكلمة . وقد بينا في الفصل الرابع أن مثل هذا الاعتبار يخفض عدد الأرقام الثنائية اللازمة لترميز كل حرف الى ٧ او ٩ اى الى حوالي ٩ ارقام ثنائية لكل كلمة .

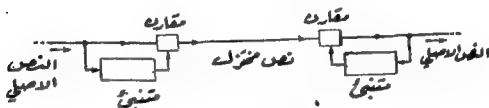
أما إذا رغبنا بمزيد من التقدم ، فعلينا دراسة العبارات والجمل ، وهذا يصل بنا الى القواعد . ان المشكلة هنا هي حقيقة كوننا لا نملك جملة متكاملة من أحكام القواعد ، وأنه حتى لو امتلكنها مثل هذه الجملة فإن نظام الاتصال الذي سيستخدمها لا شك سيكون معقداً بدرجة كبيرة . لا زال من المرغوب في الحالات العملية ترميز الأحرف الانكليزية بشكل مستقل مما يستلزم استخدام ٥ أرقام ثنائية لكل حرف .

لعله من الاهمية بمكان أن نأخذ فكرة عما يمكن أن نجزه عبر ارسال النصوص اللغوية . افترض شانون ، لتحقيق هذه الغاية ، وضعية الاتصالات التالية . نفرض أننا طلبنا من شخص ما أن يحزر مستخدماً كل معرفته باللغة الانكليزية ، ملذا سيكون الحرف التالي في نص معين . إذا كان الحزر صحيحاً ، أخبرنا صاحبه بذلك ، وطلبنا منه كتابة الحرف ، أما إذا كان خاطئاً ، فإما أن نخبره بالحرف الصحيح أو نطلب منه تكرار الحزر حتى يصل الى الحل الصحيح .

نفرض الآن أن هذه العملية تجري عند المصدر ، وأن توأماً للشخص المعني يقبع عند المستقبل ، وأن هذا التوأم يطابق الشخص عند المصدر في كل شيء ، بما في ذلك الحزر الصحيح والخاطئ . وهكذا فلا إرسال النص نطلب من الشخص عند المصدر أن يخزر ، وإذا كان حظه

صحيحاً ، كان حذر التوأم عند المستقبل صحيحاً أيضاً . وهكذا نحتاج لإرسال المعلومات الى التوأم عند المستقبل فقط في حالة الحذر الخاطئ للشخص عند المصدر وعندما يجب إرسال ما يكفي من المعلومات كي يتمكن الأشخاص عند المصدر وعند المستقبل من كتابة الحرف الصحيح .

رسم شانون مخططاً لنظام الاتصالات هذا موضحاً في الشكل ٧ - ١



الشكل ٧ - ١

يميل المتنبئ على النص الأصلي ، ثم يقارن الحذر مع الحرف الصحيح ، فلذا لو وجد خطأ ما ، أرسلت بعض المعلومات . يجري التنبؤ من الحرف التالي عند المستقبل بالاستناد الى النص المعاد إنشاؤه . تجري بعد ذلك مقارنة للإشارة المستقبلية ، فلذا لم يكتشف أي خطأ ، يتم استخدام الحذر ، وإلا يستخدم النص المختزل لإصلاح الخطأ .

لا نملك في واقع الأمر مثل هذا التوأم أو أي متنبئ فعال مماثل . وعلى الرغم من ذلك فقد تم استخدام نظام لإرسال الصور يستند أساساً على الشكل ٧ - ١ وهو في واقع الأمر ذو طابع ميكانيكي صرف وأبسط من الشكل المذكور . لقد كان هدف شانون مختلفاً على كل حال، فقد اكتشف سرعة الإرسال المطلوبة في هذا النظام وذلك باستخدامه شخص واحد فقط واستغاثته عن التوأم ودراسة الأخطاء التي يرتكبها هذا الشخص عند المصدر . لقد لخص النتائج الشكل ٥ - ٤ من الفصل

الخامس . يمكن تحسين التنبؤ بالاعتماد على ١٠٠٠ حرف سابق عوضاً من ١٠ أو ١٥ حرف . ويحتاج اصلاح الأخطاء في التنبؤات بين ٦٠٠ الى ١٢٠٠ رقم ثنائي لكل رمز . نستنتج أنه بقليل صحة هذه النتيجة فإن أنثروبي النصوص الانكليزية تقع بين ٦٠٠ - ١٢٠٣ بيت لكل حرف .

يوفر المصدر المتقطع نموذجاً جيداً للبحث والمناقشة ، إلا أنه لا أهمية على الصعيد العملي . أما السبب في ذلك فهو أن المعايير الحديثة للاتصالات الكهربائية تنص على استخدام عدد قليل من الأرقام الثنائية أو نبضات القطع والواصل لإرسال النصوص الانكليزية . يجب أن نستعمل أنفسنا كي نستطيع النطق بحوالي مائة كلمة في الدقيقة ، إلا أنه أمر في منتهى السهولة أن نرسل ١٠٠٠ كلمة عبر سلك الهاتف في كل دقيقة أو ١٠ غلايين كلمة عبر قناة تلفزيونية في كل دقيقة ، ويمكن من حيث المبدأ وليس من الناحية العملية إرسال أكثر من ١٠٠٠٠٠٠ كلمة في الدقيقة عبر القناة الهاتفية وحوالي ٥٠ مليون كلمة في الدقيقة عبر القناة التلفزيونية . لقد تخطينا في واقع الأمر من ترميز مودس الذي يُرسل بموجبه الحرف Z بسرعة أكبر من الحرف Z . تستخدم الأنظمة الحديثة نفس طول الإشارة لكل حرف .

تبرز أهمية الترميز الفعال والكفؤ في حالة إرسال الأصوات بأكثر مما تبرز في حالة إرسال النصوص ، ذلك لأن الصوت يحتاج كمية أكبر من الأرقام الثنائية لكل كلمة بالمقارنة مع النص المكتوب ، وأكثر من ذلك فالترميز للمعامل اعظم أهمية في حالة التلفزيون منه في حالة الصوت .

إن الإشارة التلفزيونية أو الصوتية هي إشارة مستمرة ، إذا ما قوونت بالنصوص اللغوية ، الأعداد ، أو الأرقام الثنائية التي هي اشارات متقطعة . وإذا استثنينا استخدام الأحرف الكبيرة والفواصل والإشارات الخاصة، تحتوي النصوص الانكليزية على الأحرف والفواصل وحسب . تتميز الموجة الصوتية أو الصوت «الإنساني» وفي كل لحظة بضغط معين ضمن مجال معين من الضغوط . سبق ورأينا في الفصل

الرابع انه اذا كانت تواترات الإشارة المستمرة محدودة ضمن مجال عرضه س ، فيمكن تمثيل الإشارة بعينات أو قياسات للسعات عددها ٢ س في كل لقية .

نتذكر على كل حال ان الانتروبي لكل رمز تتوقف على عدد القيم التي يمكن لهذا الرمز ان يأخذها ، وبما ان الإشارة المستمرة يمكنها ان تتخذ عددا لا نهاية له من القيم عند قياس عينة ما ، فإننا نندفع الى الاستنتاج بان انتروبي الإشارة المستمرة ستبلغ قيمة لانهاية من واحداث البيت في الثانية ولكل عينة .

تتوقف صحة هذا الاستنتاج على رغبتنا باستعادة الإشارة المستمرة مطابقة لشكلها الاصلي بصورة دقيقة . يهدف ارسال الإشارة الى مرصها أو إستماعها ، لذا فلا تتطلب استعادتها إلا درجة معينة من التقريب ، وهكذا فقد حدد شانون ويهدف التعامل مع الإشارات المستمرة معيارا للأمانة . ان تحقيق هذا المعيار لدى استرجاع الإشارة المستمرة لا يستلزم الاعداد محددة من الأرقام الثنائية لكل عينة أو لكل ثانية . ثبت ان انتروبي المصدر المستمر لها قيمة محددة من واحداث البيت لكل عينة أو لكل ثانية ، اذا أخذنا بعين الاعتبار التقريب القبول والمعين الذي يفرضه معيار الأمانة .

يجب أن يرتبط معيار الأمانة بالامتدادات الطويلة للإشارة وليس بالعينات فقط . وهكذا اذا فسخنا كل عينة بمقدار ١٠٪ لدى ارسالنا الصوت فإن ما سنحصل عليه هو مجرد صوت أعلى دون المساس بنوعية وجودة الصوت . اذا أرتكبنا خطأ مشواثي مقداره ١٠٪ في كل عينة فستمتلي الإشارة المسترجعة بالضجيج . وبشكل معاكس ، اذا اعتبرنا بث الصور وحدث خطأ متدرج عبر الصورة سواء بالمعان أو التباين فإن هذا الخطأ سيمضي دون ملاحظة ، أما اذا لم يكن الخطأ متدرجا بل تغير من نقطة لاخرى ، فسيكون من المستحيل احتماله .

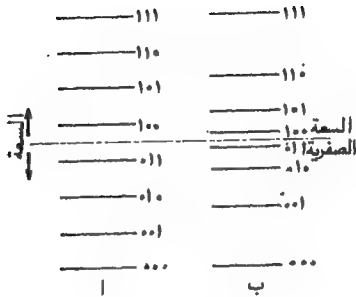
وأبنا أنه من الممكن إرسال إشارة مستمرة بجعل هيناتها تتخذ قيمة محددة فقط ، ويبدو أن ١٢٨ قيمة تكفي لإرسال الحوار الهاتفي أو الصور يجب أن نلاحظ ، أن عملية تحديد العينات في إشارات التخاطب أو الصور تعتبر في عداد العمليات الفأية في البساطة كما هي الحال في حالة ترميز الرسائل حرفاً بحرف عوضاً عن ترميزها كلمة بكلمة .

يمكن أن تتجاوز عملية أخذ النماذج من الإشارات المستمرة إلى اعتبار أكثر من عينة في وقت واحد . ولعل هذا هو الطريق السليم للترميز الفعال والكفوء للإشارات المستمرة ، إلا أن تنفيذ مثل هذا العمل هو أمر صعب فعلاً ، إذ أن العينات يتم حصرها بشكل مستقل سواء في نظم تعديل رموز النبضات التي تنقل المخابرات الهاتفية من مقسم هاتفي إلى مقسم آخر ومن بلدة لأخرى أو في المقاسم الرقمية التي تؤمن المخابرات الإبعد . كذلك تحصر العينات بشكل مستقل عند استقبال الصور الواردة من المرئع والمشتري والكواكب الإبعد .

تعتبر عدة سويات أو سعات في حالة نظم تعديل رموز النبضات ، وتربط اقرب سوية أو سعة بكل عينة ، وإذا استخدمنا كمثال ثنائية سويات فنجعل خيارنا لها بحيث تتباعد عن بعضها بمسافات متساوية كما يوضح الشكل ٧ - ٢ . يرسل المنسوب المثل للعينة بيت الرقم الثنائي المثبت على يمين المنسوب .

ستطيع أن نذهب بالترميز إبعد من ذلك فنضيق المسافات بين المناسب ، فبدلاً من المسافات المتساوية بينها كما في الشكل ٧ - ٢ - ١ نستطيع تضيق المسافات بين المناسب للإشارات الصغيرة وزيادتها للإشارات الكبيرة كما يوضح الشكل ٧ - ٢ - ب .

أن سبب هذا ، هو بالطبع ، أن آذاننا حساسة لأي تغير طفيف في الضغط فوق أو تحت المعدل أكثر بكثير من حساسيتها للتغيرات الكبيرة جداً بالنسبة لهذا المعدل وما يقابلها من تغيرات مقابلة موجبة أو سالبة



الشكل ٧ - ٢

في كيون الإشارة . يؤدي ضغط السمات العالية عند المصدر وتحديدًا مرة أخرى عند المستقبل إلى تخفيض عدد الأرقام الثنائية اللازمة لكل عينة مع الحفاظ على جودة الإرسال وذلك بالمقارنة مع الحالة التي نحافظ فيها على فروقات ثابتة بين السمات ، ويسجل هذا الانخفاض ٤ أرقام ثنائية من ١١ إلى ٧ .

يترب علينا تحقيق دراسة شاملة للصوت والسمع إذا وغبنا بإرسال أكثر فعالية للتخاطب ، وجل ما يلزمنا لاقتناع السامع بجودة الإرسال هو تحقيق دقة معقولة في البث .

ليست الفعالية هي كل شيء . لا يستطيع رمز الاصوات إرسال أكثر من صوت واحد في وقت واحد ، كما أن هذه الرموزات تنصرف بشكل

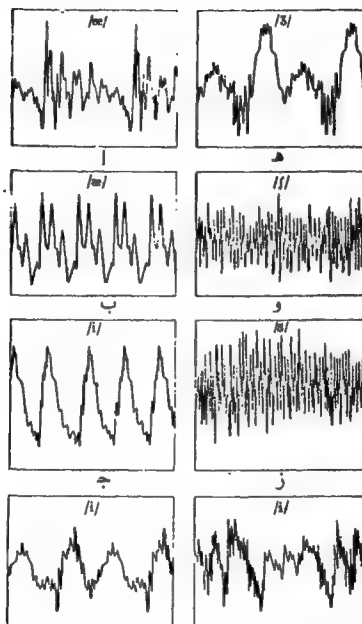
سواء اذا تكلم المرسل في جو من الضجيج . نتمكن من تجاوز هذه الصعوبات بتحقيق ارسال اكثر فعالية لموجة الصوت ، وهو ما يسمى بتحليل الموجة ، إلا أن عدداً من الأرقام الثنائية مساو لـ ١٥٠٠٠ - ٢٠٠٠٠ رقم في كل ثانية يبقى ضرورياً للتخاطب المقبول .

يوضح الشكل ٧ - ٣ اشكال مختلفة لامواج التخاطب الصوتية ، أي تغير ضغط موجة الصوت مع الزمن ، وما يقابله من تغير في الكمون الكهربائي الممثل له . نلاحظ أن بعض الاشكال الموجية تكرر نفسها بدقة ، سيما في حالة الاحرف الصوتية الانكليزية (بدءاً من الشكل ٧ - ٣ - ١ حتى ٧ - ٣ - ٥) . أو ليس من الممكن في هذه الحالة ارسال الشكل النموذجي للموجة واستخدامها من ثم خلال ادوار متكررة لاحقة . الواقع أن هذا من الصعوبة بمكان ، إذ أن الآلة لن تستطيع تحديد الدور الواقعي للحرف من خلال الكلام المنطوق ، فلقد تم تجريب هذا الامر وكان الكلام الناتج مفهوماً إلا أنه كان مشوهاً بدرجة كبيرة .

ينبغي استخدام طرق أكثر عمومية إذا أردنا ترميز الكلام المنطوق بشكل فعال . يجب أن نعلم أولاً عدد الاصوات المختلفة التي يجب ارسالها وما مدى تحسين اسماعنا إزاء مشكلة تمييز هذه الاصوات عن بعضها .

يتغير ضغط الهواء الممثل للاصوات بشكل سريع ، وتصل سرعة هذا التغير إلى مرتبة عدة آلاف في الثانية ، بينما تمارس أبادتنا التحكم في حبالنا الصوتية ببطء بالغ ، وفي أحسن الاحوال تغير نمط الانتاج الاصوات عدة عشرات من المرات في كل ثانية . لهذا فالصوت يمكن أن يظهر لنا ، وهو في الواقع كذلك ، أبسط بالمقارنة مما قد نستخلصه من دراسة التغيرات السريعة في ضغط الامواج الصوتية .

ما هو نوع التحكم الذي نمارسه على أعضاء التنصوت فنياً . نتحكم أولاً باصدار اصوات مسموعة بواسطة تأثيرها في حبالنا الصوتية . هذه الحبال هي عبارة عن شفتين أو لثنتين من نسيج عضلي مرتبط إلى طبقة



ح د
 ٠.٢ ٠.١
 الوقت بالثواني

الشكل ٧ - ٢

غضروفية تعرف باسم الحنجرة ، وهي نائثة لدى الرجال وتعرف باسم تفاحة آدم . تكون الحبال الصوتية مفتوحة في حالة الصمت ، ويمكن تقريبها من بعضها بحيث أن الهواء المندفع من الرئتين يمرورده بينهما سيتسبب بإصدار أصوات معينة . يكون الصوت الصادر ذي تواتر عال جدا إذا كانت الحبال الصوتية جد قريبة من بعضها ، بينما ينخفض ذلك التواتر إذا ابتعدت الحبال عن بعضها .

تمتلك دقات الهواء المارة عبر الحبال الصوتية تواترات كثيرة . يلعب الفم والمشفةان دور مرئان معقد يبرز بعض التواترات أكثر من غيرها . وتتوقف هذه العملية على وضع اللسان داخل الفم ، وعلى مدى انفتاح الفتحين الانفيين على الفم والراغامي وكذلك على مقدار انفتاح الفم ووضع الشفتين .

يتم المنطق بالأحرف الصوتية وغيرها من الأحرف وكذلك تنوع اشكال التصويت من طريق حث الحبال الصوتية وإعطاء هيلثات مختلفة للجوف الغموي .

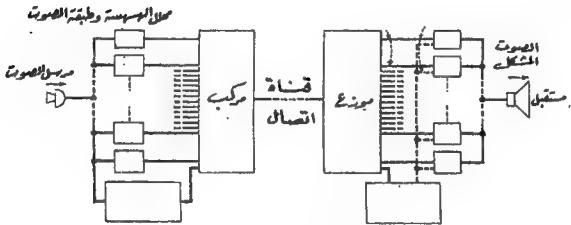
تم صياغة الأصوات الخاصة ببعض احرف اللغة الانكليزية مثل : p , b , g , t بإيقاف المجري الصوتي عند عدة نقاط بواسطة اللسان أو الشفتين ، مما يخلق ضغطا هوائيا ، لا يلبث أن يطلق فجأة . تستخدم الحبال الصوتية في إنتاج بعض الأصوات ، كالصوت الخاص بالحرف الانكليزي B ولا تستخدم في إنتاج أصوات أخرى كالصوت الخاص بالحرف P ..

وملذا من بعض الأحرف والتراكيب الأخرى مثل S , SH . . الواقع أن إصدار الأصوات الخاصة بها يتم عبر انقباضات مختلفة ، وتستعمل الحبال الصوتية في بعض الأحيان ، كما في الصوت الخاص بالتراكيب ZH .

إن سرعة التنفير للأعضاء الصوتية هي أقل بكثير من الأصوات المنتجة إلا يمكن أن نستخدم هذه الحقيقة في الترميز الفعال للتخاطب .

أخترع هومر دادلي من مختبرات بيل في الثلاثينات من هذا القرن وقبل أبحاث شانون في نظرية المعلومات ، طريقة من هذا الطراز لارسال المعلومات دعاهما بمرمز الاصوات . يوضح الشكل ٧ - ٤ وحدة الارسال (المحلل) ووحدة الاستقبال (المركب) من مرمرز اصوات .

٤٧٠



الشكل ٧ - ٤

ينفذ في المحلل بديل كهربائي للصوت الى ١٦ مرشحاً ، يحدد كل منها شدة الإشارة الصوتية في خزام معين من التواترات ومن ثم يبتدئ الإشارة الى المركب الذي يعطي هذه المعلومات . يجري كذلك تحليل آخر لمعرفة الأحرف غير الصوتية من الأحرف الصوتية ، وفي حالة وجود الأحرف الصوتية يتم اكتشاف طبقتها .

إذا كانت الأحرف الصوتية غائبة ظهر هسيس عند المركب ، وإذا كانت موجودة صدرت سلسلة من النبضات الكهربائية بسرعة تناسب نفثات الهواء عبر الجبال الصوتية للناطق .

يعرر الهسيس أو النبضات عبر مجموعة من المرشحات ، حيث يعرر كل مرشح حزمة من التواترات مقابلة لمرشح معين في المحلل . يتم التحكم

بكمية الصوت المارة عبر مرشح معين من المركب بواسطة خرج المرشح المقابل في المحلل بحيث تكون هذه الكمية مساوية لما يشير لوجوده مرشح المحلل في الصوت وضمن ذلك المجال من التوافقيات .

تنتج هذه العملية الأصوات المفهومة . فما يتم هو ان المحلل يستمع الى الأصوات ويحللها ، ثم يصدر التطبيقات للمركب ، والذي هو آلة ناطقة صناعية ، كي يقول كل الكلمات مرة أخرى بنفس اللهجة والطبقة الصوتية للنطق .

ان لعظم رموزات الأصوات لهجة كهربائية قوية وغير مستحبة . لقد قادت هذه المشكلة الى افكار جديدة حول العوامل المؤثرة على طبيعة الصوت ، الا اننا لن نتابع هذا الموضوع هنا . وتبقى رموزات الصوت ، رغم ذلك مفيدة ، حتى الرموزات غير الكلمة منها . ويكون من الضروري أحياناً تشفير إرسال الأصوات . اذا اخترلنا الحديث الى ارقام ثنائية بتعديل ترميز النبضات ، يجب عندها ارسال من ٣٠٠٠٠٠ الى ٦٠٠٠٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، ينخفض هذا الرقم الى ٢٤٠٠٠ باستخدام رموز الأصوات .

لا يمثل رموز الأصوات في الشكل ٧ - ٤ الا نموذجاً من اصناف عديدة من الأجهزة ، نطلق عليها جميعاً اسم رموزات الأصوات ، وتشارك بميزة تحليل الأصوات وإرسال اشارات تحت آلات ناطقة . يجد التحليل في الترميز الخطي المتنبئ عوامل بطيئة التغير يمكنها التنبؤ بالعينة القادمة من الحديث على اساس مجموع عينات سابقة مأخوذة بأوزان مختلفة وفق أهميتها . يمكن بث إشارة خطأ أيضاً بهدف تصحيح خرج الآلة الناطقة . يعطي الترميز الخطي المتنبئ حديثاً جيداً اذا أرسل ٩٦٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، وحديثاً مفهوماً اذا أرسل ٢٤٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، وأخيراً حديثاً واضحاً للغاية اذا ضبط هذا الرقم الى ٦٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية .

يمكن استنتاج عوامل أخرى للحديث من عوامل التنبؤ الخطي . يمكن استنتاج اشارات القناة المميزة لرموز اصوات القناة في الشكل ٧ - ٤

من عوامل التنبؤ الخطي . كذلك يمكن استنتاج تواترات الطنين لجهاز التصويت المميزة لأصوات مختلفة . لقد اقترح استخراج العوامل المؤثرة على جهاز التصويت وإرسالها . إذا استطعنا استخدام هذه العوامل لتمييز الأصوات المختلفة للحديث ، وأرسلنا دلائلها وحسب ، لحصلنا على ما يسمى مرمز أنواع الأصوات والذي يستطيع إرسال الحديث بنفس كفاءة وفعالية النص .

سنستعرض مرمز الأصوات بشكل سريع قبل اغلاق موضوعه .

لنلاحظ أن إرسال الأحاديث باستخدام أكثر رموزات الأصوات اقتصادية يستلزم كمية من الأرقام الثنائية لكل كلمة أكثر مما يلزم لإرسال النصوص المكتوبة . ويتعلق ذلك ، بشكل جزئي ، بالصعوبات التكنيكية في تطيل وترميز الأحاديث بالمقارنة مع النصوص المطبوعة ، إضافة إلى أننا في حالة إرسال الأحاديث ، نبث المعلومات كما هي الحال في حالة النصوص ، إضافة لخصوصيات الأحاديث كنوعية الأصوات وطبقته واللهجة وغيرها . بكلمة مختصرة إن أنثروبي الأحاديث أكبر من أنثروبي النص محسوبة لكل كلمة .

يتميز مرمز الأصوات عن غيره بقابليته ترميز الأحاديث بفعالية وكفاءة ، وسبب ذلك أن مكونات أجهزة التصويت تتغير ببطء بالمقارنة مع تقلبات الأمواج الصوتية التي تنتجها تلك الأجهزة . تعتمد فعالية رموزات الأصوات أيضاً على حدود حاسة السمع لدى الإنسان .

أن أكثر أنواع الأصوات تعقيداً هو الهيسيس كما في حالة نطق SH (الشكل ٧ - ٣ - ز) ، كما أن نطق حرف S بشكل متكرر يرتب شكلاً موجياً مختلفاً تماماً . ويتفرض الأمر عدداً كبيراً من الأرقام الثنائية في كل ثانية لإرسال النطق في كل مرة ، أما بالنسبة للأذن الإنسانية ، فيبدو النطق الأول لحرف الـ S ممثلاً للنطق الثاني إذا كان له نفس محتوى التواترات بشكل عام . وهكذا لا يتوجب على مرمز الأصوات استعادة صوت الحرف S

الذي نطقه المتكلم ، بل نكتفي منه بتكرار الصوت S الذي له نفس محتوى التواترات تقريباً ، وبالتالي يكون له وقماً متشابهاً .

يتضح إذن أن الترميز، الفعّال في إرسال الأحاديث يعتمد على تحديد نماذج بسيطة وهامة وإعادة تشكيلها عند المستقبل . تبرز أهمية الترميز الفعّال بشكل أكبر في التلفزيون بالمقارنة مع إرسال الأحاديث ، لأن القضية تتعلق هنا بقناة إرسال ذات سعة أكبر . هل يمكن تطبيق نفس المبادئ في حالة التلفزيون .

واقع الأمر إن مشكلة التلفزيون أعقد بكثير من إرسال الأحاديث المنطوقة ، وسبب ذلك بشكل جزئي أن حس البصر أكثر تفصيلاً وتميزاً من حس السمع ، ولأن التلفزيون يرسل صوراً شديدة التنوع ومن مصادر مختلفة ، بينما تتولد الأحاديث من نوع واحد من أجهزة التصويت .

وهكذا ، فلاستخدام طريقة شبيهة بمرمز الأصوات في حالة التلفزيون علينا أن نقصر إرسالنا التلفزيوني على نوع واحد من مصادر الصور ، كالوجوه الانسانية على سبيل المثال .

لنتخيل نموذجاً مطلبياً للوجه الانساني عند المستقبل . يمكننا حفظ مواصفات هذا الوجه في ذاكرة كومبيوتر ضخم . ينظر المرسل أولاً إلى الوجه الذي سيرسل ، ثم يقوم بتشكيل النموذج عند المستقبل بالشكل والهيئة . كما أن على المرسل أن يلاحظ مصادر الضوء ويكررها ذاتها بالشدة والاتجاه عند المستقبل . يتابع المصدر حركات العينين للشخص الذي يتكلم بالقرب منه ، وكذلك حركات الشفتين والفكين وخطبات العضلات الأخرى لكي يتمكن النموذج عند المستقبل من فعل الشيء المطابق . يبدو هذا التصور فعالاً للغاية وسيكون اختراعاً عظيماً إذا استطاع أحد ما تحديد طريقة تنفيذ العمليات التي أتيت على ذكرها . ولكن ما أسهل الأمنيات وما أصعب الفعّال (ينطبق ذلك على تأليف السيمفونية المباشرة لبيتهوفن ، أو تقليد لوحة كبيرة على شيء ما ، وكذلك على اختراعنا المنشود) .

لقد أصبحت آمال الناس غير المتحققة ، في عصرنا هذا عصر التطور العلمي والتكنولوجي غير المحدود ، ذات أهمية قصوى لدرجة تم معها استخدام مصطلح خاص للتعبير عن هذه الأحلام . هذا المصطلح هو الاختراق . تستخدم هذه الكلمة أحيانا لوصف شيء غير مهم البتة وتافه ، قد تم انجازه فعلا .

النفوس معنا جانباً أحلام المستقبل نجد أن كل نظم إرسال الصور تتبع نموذجاً واحداً . يتم مسح الصورة المراد إرسالها لاكتشاف شدة الإضاءة عند مختلف نقاطها ويجري ذلك عبر سلسلة من الخطوط المتوازية والمتقاربة ، وفي حالة التلفزيون اللون تقرأ ثلاثة أطراف بالوان مختلفة في وقت واحد . تحدث عند المستقبل العملية العاكسة إذ يتم طبع النقطة الضوئية على نماذج مطابقة من الخطوط وفق شدة الإشارة القادمة والمتناسبة بدورها مع شدة إضاءة النقطة عند المصدر . تقتصر كل المحاولات التي جرت حتى الآن للترميز الفعال على طريقة المسح هذه .

يستخدم التلفزيون اللون طريقة ترميز متقدمة للغاية ، فشدة إضاءة الصورة في هذه الحالة دقيقة جداً ، بينما نموذج اللون أقل تفصيلاً . وهكذا يمكن إرسال الصورة التلفزيونية اللون المطابقة بتفاصيلها لصورة غير ملونة عبر نفس قناة الإرسال لهذه الأخيرة . يستخدم التلفزيون اللون ، كما هو معروف ، إشارة تمثيلية أو تشبيهية ، إذ أن الصورة لا تختزل إلى نبضات قطع ووصل منفصلة .

سيزداد بالتدريج استخدام تعديل ترميز النبضات لإرسال كل أنواع الإشارات بما فيها إشارات التلفزيون . سيتم مسح الصورة بالطريقة المعتادة ، إلا أن شدة إضاءتها سترمز في سلسلة من الأرقام الثنائية التي تحدد شدة إضاءة عناصر متجاورة منفصلة من الصورة يسمى كل منها : بيكسيل وتقع جميعها على خط واحد . كانت هذه هي طريقة إرسال الصور من المركبات التي أمّت كوكبي المريخ والمشتري .

إن كل طرق الترميز التلفزيوني الفعال هي من النوع الرقمي . تتعامل هذه الطرق مع سلسلة من الأرقام الثنائية المثلة لإضاءة كل بيكسيل من خط معين .

تغير شدة الاضاءة في مساحات كبيرة من شاشة التلفزيون بشكل متدرج وناعم من بيكسيل لبيكسيل . يمكن ، عبر هذه المساحات ، التنبؤ عن اضاءة البيكسيل التالي ، من خلال المعلومات المتوفرة عن اضاءة كل بيكسيل سابق في نفس الخط وربما في الخط السابق . ان كل ما نلزمنا معرفته عند المستقبل هو الخطا في هذا التنبؤ ، لذا فما تقوم بإرساله هو الفرق بين شدة الاضاءة الحقيقية والشدة التي نتوقعها عند المصدر والمستقبل . سيكون التنبؤ بشكل ما سيء في المناطق المشغولة من الصورة ، لذا يصبح الفرق المرسل عندها كبيراً .

يمكننا ترميز فروق الاضاءة بأكثر ما يمكن من الكفاءة والفعالية باستخدام طريقة هوفمان وبعبث تمثل الرموز القصيرة فروق شدة الاضاءة الصغيرة الأكثر تواتراً ، بينما تمثل الرموز الطويلة الفروق الأكبر والأقل تواتراً . يؤدي تنفيذ هذا المخطط الى توليد الأرقام الثنائية المثلة لفروق شدة الاضاءة بسرعة متباينة ، اذ ستكون تلك السرعة منخفضة عند مسح المناطق المتدرجة الاضاءة من الشاشة ، وعالية في المناطق المشغولة من الشاشة . يجب ان تغذي هذه الأرقام الى منظم معلوماتي بغية ارسالها بسرعة ثابتة ، اذ يخزن هذا المنظم الأرقام الواردة اليه ثم يعيد ارسالها وفق السرعة الثابتة المساوية للسرعة الوسطية التي تتدفق وفقها المعلومات اليه . يجب استخدام منظم معلوماتي مماثل عند المستقبل .

يرتب استخدام هذا النظام في الترميز ، بهدف تحقيق ارسال تلفزيوني جيد ، تخفيض عدد الأرقام الثنائية اللازمة في كل ثانية بنسبة $\frac{1}{4}$ الى $\frac{1}{3}$ بالمقارنة مع عدد الأرقام الثنائية المستخدمة في حالة ترميز شدة الاضاءة عند كل بيكسيل .

يمكن تحقيق نجاح أكبر بتخزين شدة الاضاءة عند كل بيكسيل من الصورة السابقة واستخدامها من ثم في عملية التنبؤ عن شدة الاضاءة في

البيكسيل التالي المبني ارساله ، وتظهر فعالية هذه الطريقة اكثر عندما نرسل صورة تجمع من الناس على خلفية ثابتة ، اذ لا تتغير شدة اضاءة كل بيكسيل من الخلفية لدى الانتقال من صورة لآخرى .

تستخدم بعض النماذج التجريبية الاعمق حقيقة أن حركة شكل ما على خلفية معينة تتم بإيقاع اجمالي . وهكذا يمكن التنبؤ بشدة اضاءة كل بيكسيل في الشكل المتحرك من اضاءة بيكسيل آخر على بعد ثابت في الصورة السابقة .

اذا مثل كل بيكسيل من الصورة التلفزيونية بـ ٨ ارقام ثنائية (في حالة صورة ممتازة) ، فيمكن ارسال هذه الصورة باستخدام ١٠٠ مليون رقم ثنائي في كل ثانية . واذا استخدمنا التطويرات في الترميز التي اشرنا اليها للتو ينخفض هذا الرقم الى ٣.٢ مليون وقد تم تخفيضه في بعض الحالات الى ٦ مليون فقط . ولعل بعض الدراسات الى إمكان تخفيضه الى رقم ادنى بحدود ١٥ مليون في بعض الحالات الخاصة كصورة وجه على خلفية ثابتة .

هناك طريقة أخرى للإرسال المفعال للصورة التلفزيونية هي طريقة التحويل . يتم وفق هذه الطريقة تمثيل كل بيكسيل من صورة تلفزيونية او من جزء منها كمجموع عناصر مختارة من نماذج قياسية . ويتم ارسال سماتها بدقات منتقاة .

نراجع ما استعرضناه حتى الآن . هناك ثلاثة مبادئ لترميز الإشارات بشكل فعال :

١ - لا نرمز الإشارة بمعدل هيئة أو حرف في وقت ما ، بل نرمز ما امكن من امتداد الإشارة .

٢ - نعتبر القيود الخاصة بمصدر الإشارة .

٣ - نأخذ بعين الاعتبار محدودية العين والأذن في تقضي الاخطاء عند إعادة تشكيل الإشارة .

يتضمن مرمز الأصوات هذه المبادئ بشكل جيد . لا يتم تفحص الشكل الآن لوجه الصوت بكل تفاصيلها . يرسل بدلاً من ذلك توصيف للشدة المتوسطة عبر مجال معين مرسل من التواترات ، إلى جانب إشارة أخرى تبين الأحرف الصوتية ، وطبقة الصوت لها . يعد هذا الترميز فعالاً بما فيه الكفاية لأن أعضاء التصويت لا تغير أماكنها بسرعة أثناء توليد الأصوات . يولد مرمز الأصوات عند المصدر إشارة صوتية لا تشابه في تفاصيلها الإشارة الأصلية ولكنها تشبهها بشكل عام ، وذلك بسبب القصور الطبيعي لحس السمع لدينا .

يمثل مرمز الأصوات نموذجاً مثالياً لأجهزة الإرسال الفعال . يأتي بعده ربما التلفزيون الملون حيث تعرف تغيرات الألوان عبر الصورة بعدة أقل من تغير الشدة . يعتمد ذلك على قصور العين عن مشاهدة التفاصيل في الصورة الملونة .

يجب على فن الاتصالات المعاصر ، بعيد ذلك ، أن يستخدم وسائل تعتبر وفق نظرية الاتصالات غير فعالة بما فيه الكفاية ، ذلك لأنها لا ترمز امتدادات طويلة من الإشارة في وقت ما .

ويبقى الترميز الفعال هاماً للغاية ، ويتجسد ذلك بشكل خاص في حالة إرسال الإشارات ذات النحزم العريضة نسبياً (تلفزيون أو إشارات صوتية) عبر الدارات الباهظة التكاليف ككوابل الهاتف عبر المحيط .

لا شك أن المستقبل سيشهد طرقاً أكثر فعالية في الترميز وستتحقق نتائج باهرة ، إلا أن علينا الحذر في المضي بعيداً أكثر مما ينبغي .

لنتخيل مثلاً أننا نرسل نصاً إنكليزياً حرفاً بحرف . إذا ارتكبنا بعض الأخطاء في إرسال عدد من الأحرف ، نستطيع رغم ذلك استرجاعها من النص :

Here I have replaced a few vowels by o.

يمكننا استبدال الأحرف الصوتية بحرف x والحصول على :

Hxxx x hxxx replaced the words by x.

إذا رمزنا النصوص اللغوية كلمة بكلمة يكون الترميز أكثر فعالية ، وإذا ارتكبنا خطأ في هذه الحالة أثناء الإرسال ، لا تكون في واقع الأمر قد حصلنا على كلمة مهجأة بشكل خاطيء وكل ما في الأمر أن كلمة قد حلت محل أخرى . يمكن أن يترتب على ذلك بعض التعقيد ، مثلا استبدال جملة مثل : هطل الثلج في الشتاء ، بجملة أخرى هي : هطل الثلج في الصيف .

طبعاً يمكن أن نكتشف الخطأ بملاحظتنا أن الكلمة غير مناسبة . ولكن لنفرض أننا استخدمنا ترميزاً مغايراً لا يمكنه إلا استرجاع التراكيب الإمبرائية وحسب ، عندها ستكون فرصتنا قليلة للغاية في اكتشاف أي خطأ في الإرسال .

تتصف النصوص اللغوية ومعظم مصادر المعلومات الأخرى بالفرازة ، إذ أنها تقدم بدائل متعددة للمستقبل . إذا وقعت بعض الأخطاء الناجمة عن استبدال أحرف بأخرى ، فلا يعني ذلك أن الرسالة قد دمرت ، إذ نستطيع استنتاج الأحرف غير الصحيحة من الأحرف التي تم إرسالها بشكل صحيح . ولعله هذا هو السبب ، أي الفرازة ، في أن كلا منا يستطيع قراءة ما كتبه الآخر بيده . عندما ترسل إشارة مستمرة وفق عينات عند لحظات زمنية معينة تتسبب الأخطاء في سمات الإشارات بعض الترقمة في الصوت المرسل أو بعض البقع في الصورة المبتوثة .

لقد كان هدفنا الأول حتى الآن هو إزالة هذه الفرازة ، بحيث نتمكن من إرسال أقل عدد ممكن من القوشرات الهامة التي يمكن بواسطتها استعادة الرسالة . ولكننا نستنتج استناداً ما قدمناه ، أن النجاح الكامل في تحقيق هذا الهدف سيعرض الرسالة المبتوثة لخطر الضياع ، إذ

أن أي خطأ في الإرسال سترتب وصول رسالة خللثة بمرمتها وليست مشوهة وحسب . أما إذا فشلنا في تحقيق هدفنا المثالي بمقدار ضئيل ، فإن خطأ الإرسال سيتترك آثاراً كبيرة جداً على الرسالة المبتولة دون تدميرها .

نعلم جميعاً أن هناك القليل من الضجيج في الإرسال الكهربائي ، ويتمثل بهيس في الراديو ويقع للجنة في التلفزيون ، وعلينا أن نضيف إلى معلوماتنا أن مثل هذه الظاهرة هي من أصل الطبيعة ولا يمكن التخلص منها بشكل نهائي . هل يمكن لذلك أن يفسد خطتنا من حيث الأساس ، تلك الخطة الهادفة لترميز الرسائل التي يولدها مصدر للإشارات في عدد من الأرقام الثنائية أكبر بقليل من التروبي المصدر .

سنتناول هذا الموضوع في الفصل القادم .



المفصل الثامن

القناة الرابعة والفجيج

من الصعب ان يضع احدنا نفسه مكان آخر ، وعلى الاخص ان يضع نفسه مكان من عاش في ازمان غابرة . ملأ يمكن ان يكون شأن شخص من العصر الفيكتوري مع الازياء المعاصرة ، وهل كانت قوانين نيوتن في الحركة والثقالة مذهلة لمعاصريه كما كانت نظرية اينشتين مذهلة بدورها بالنسبة لمعاصري اينشتين . ما هو الشيء المحير في النسبية . ان الطلبة المعاصرين يتقبلونها دون تعليق وبشيء من الحتمية ، كما لو ان افكارا اخرى هي الغريبة والمدهشة والتي لا يمكن تفسيرها .

إن سبب ذلك ، بشكل جزئي ، هو ان موافقتنا وليدة محيطنا وعصرنا ، ولأنه ، في حالة العلم على الاقل ، تأتي الافكار المحدثة كاستجابة لاسئلة مستجدة أو مصلفة بشكل أكثر دقة . نتذكر انه وفق افلاطون ، استطاع ارسطو استجرار برهان هندسي من أحد اثباته ببساطة عن طريق طرح بعض الاسئلة المعقّرة . لا يحتمل أن يتوصل الى إجابة مناسبة مهما كانت ، أي من الذين لم يطرحوا على انفسهم اسئلة معينة ، وعندما يصاغ السؤال من خلال الإجابة الكامنة في الدماغ ، يبدو الجواب في منتهى الوضوح .

لقد تنبه الصامدون في الاتصالات منذ البداية الى حقيقة ان الدارات أو الاقنية ليست كاملة . نحن نستمع في الهاتف أو الراديو الى الإشارة المطلوبة على خلفية من الفجيج ، سواء اكلن عاليا أو خافتا ، والذي

يختلف من قرعة الكهرباء الساكنة الى الهيسيس المستمر ، أما في التلفزيون فتبدو الصورة متوضعة على خلفية من البقع الثلجية الخفيفة أو القوية . كذلك يختلف الحرف المستقبل عن الحرف المرسل في البث البرقي .

نفرض أن أحدنا قد سأل مهندساً للاتصالات عام ١٩٤٥ من ضوء الضجيج ، ولربما صاغ السؤال في الجملة التالية : ما الذي يمكن فعله لإزالة الضجيج ، من المحتمل أن جواب المهندس كان سيأتي على النحو : فرد من استطلعة المصدر أو أجعل المستقبل أقل ضجيجاً ، وتأكد من أن المستقبل سيكون أقل حساسية لتغيرات التواترات الغير متضمنة في الإشارة .

عندها يمكن أن يكون السائل قد عاد للإلحاح : إلا يمكن أن نفعل أي شيء آخر ، ولا يتوانى مهندس عام ١٩٤٥ من الإجابة السريعة بقوله : استخدام تعديل التواترات الذي يظلل حزاماً معرض ، وبهذا تقلل من اثر الضجيج ..

لنفرض أن الجدول قد استطرد ، وأن السائل طرح السؤال التالي : يمكن أن يترجم على الضجيج ، لدى بث رسالة من لوحة أزرار ، وصول بعض الاحرف الى المستقبل بشكل خاطيء ، كيف يمكن أن نتحاشى ذلك من الممكن أن تكون أجابة مهندسنا مضافة على النحو التالي : اعرف انني اذا استخدمت خمسة نبضات قطع أو وصل لتمثيل رقم ثنائي ، واصطلحت أن التركيب المكون من ثلاثة نبضات قطع ونبضتي وصل هو الذي يمثل الرقم الثنائي ، لا يمكنني في بعض الحالات تحديد الخطأ مثلاً عندما تحتوي الإشارة المستقبلية على عدد من نبضات الوصل أقل أو أكبر من اثنين .

من الممكن أن سألنا قد تابع الموضوع الى حد أبعد بعرضه المشكلة الآتية : نفرض أن دارات لوحة الأزرار تسبب الأخطاء ، هل هناك من طريقة لإبصال الرسالة الى هدفها .. أما رد المهندس ، فكان على الأرجح : أعد البث عدة مرات ، إلا أن هذا مضيعة للجهد . أصلح الدارات المعطوبة

نقترب هنا شيئاً فشيئاً من الاسئلة التي لم تطرح قبل شانون .
الا أننا ذيل التعرض لها سنتابع سيناريو حوارنا الافتراضي بأن نعطي
للسائل دور الكلام يسأله : افترض انني اخبرتك بخصوص ترميزي
الجيد لرسالتي وانني ارسلتها عبر قناة ذات ضجيج بنسبة مهمله
تماماً من الاخطاء ، وكانت نسبة اقل من اي قيمة محددة . وافترض
اكثر من ذلك انني اخبرتك أن معرفتي بنوعية وشدة الضجيج في الدارة
مكتنني من حساب عدد الاحرف الممكن ارسلها عبر القناة في كل
ثانية وان ارسال عدد من الاحرف عبر الدارة اقل من العدد المحسوب
سيتم افتراضياً دون خطأ ، بينما اذا زاد عدد الاحرف المرسله من
العدد المحسوب ، أصبح الوقوع في الخطأ محتملاً .

يستمر السيناريو باجابة مهندس عام ١٩٤٥ : الافضل ان تريني
ما تفعل . لم افكر بهذه الطريقة من قبل ، واعتقد على كل حال ان ما تقوله
غير محتمل عموماً ، اذ ان ازدياد الضجيج يفضي الى ازدياد الخطأ ،
كما ان اعادة البت عدة مرات سيحسن الوضع في حالة عدم وجود كمية
كبيرة من الاخطاء . ولكن يبقى كل هذا مكلفاً للغاية هل من الممكن ان
ينطوي كلامك على مفزى ما ، اذا تحقق وجود ذلك المفزى فاصبح في
حيرة من امري . يا لطريقة عرضك هذه .

ومهما ذهبنا في السيناريو ابعد من ذلك فلن نجد الا مزيداً من اخطاء
المهندس الذي ضلته طريقة التناول السابقة . وما نود تثبيته هنا ان
المهندسين والرياضيين الذين عاصروا انفترة الانتقالية يشتركون جميعاً
بمشاعر واحدا ازاء اعمال شانون في حقل ارسال المعلومات عبر قناة ذات
ضجيج . انها مشاعر الدهشة والاعجاب . الا انني اعرف رجلاً غير
متخصص لم يجد في تلك الاعمال ما يدهش ، فما عساني فعل ازاء مثل
هذا الموقف .

ربما ان احسن طريقة لتناول الموضوع هي تلك التي تعرض لمشكلة
القناة ذات الضجيج كما نفهمها اليوم . ومهما كان من رفع الاسئلة
واجابتها ومهما بدا الحوار طبيعياً ومفروضاً ، فالقضية برمتها تنتمي

لرحلة ما بعد شاتون وإن كان على القارئ أن يتعجب أو لا يتعجب فهذا هو شأنه وله الخيار في ذلك .

لقد قدمنا حتى الآن عرضاً للأساليب البسيطة والصعبة على حد سواء والمهادفة لترميز النصوص والأعداد لتحقيق الإرسال الفعال والكفؤ وربنا كيف يمكن تمثيل إشارة كهربائية مرض حزامها س بعينات أو سعت عددها ٢ س في الثانية مأخوذة في لحظات تفصل بينها فترات زمنية بطول ^١ _{٢ س} ثانية . كما سبق واستنتجنا أن استخدام تعديل ترميز النبضة ،

يقضي إلى توظيف حوالي ٧ أرقام ثنائية لتمثيل سعة كل هيئة . وهكذا فبالجهد إلى تعديل ترميز النبضات أو أي منهج آخر معقد وفعل ، نستطيع بث إشارات الأصوات أو الصور عبر سلسلة من الأرقام الثنائية أو نبضات القطع والوصل ، أو النبضات الكهربائية السالبة والموجبة .

تؤكد صحة كل ما تقدم إذا استلم المستقبل نفس الإشارة التي صدرت عن المرسل ، إلا أن الواقع العملي يختلف من ذلك ، فللمستقبل قد يستلم في بعض الأحيان . إذا كانت الإشارة الصادرة ١ ، وإذا كانت الإشارة الصادرة . يمكن أن ينجم ذلك عن أعطال القواطع الكهربائية في الدارات السريعة . كذلك قد يحصل الخطأ بسبب تدخل الإشارة والضجيج ، سواء أكان ضجيجاً من جهاز مصنوع أو من العواصف المغناطيسية .

نستطيع أن نبين من خلال حالة بسيطة كيف تحدث الأخطاء بسبب تدخل الإشارة والضجيج . لننتصور أننا نرغب بإرسال عدد كبير من الأرقام الثنائية . أو ١ في كل ثانية عبر سلك باستخدام إشارات كهربائية يمكننا تمثيل الإشارة الناقلة لهذه الأرقام بمتتالية من العينات ع كما في الشكل ٨ - ١ ، حيث تكون كل هيئة إما ١ أو - ١ يتوفر لنا هنا سلسلة من الكمونات السالبة والموجبة الممثلة للأرقام الثنائية .

١. ١١١. ٠. ١.

نفرض الآن أننا أضفنا الى الإشارة كمون ضجيج عشوائي قد يكون موجباً وقد يكون سالباً . يمكننا أن نمثل ذلك أيضاً بعدد من عينات الضجيج ن المأخوذة بشكل متوافت مع العينات ع كما في الشكل ٨ - ١ . يعرض نفس الشكل الإشارة المركبة من الضجيج والإشارة الأصلية ع + ن .



الشكل ٨ - ١

إذا فرنا الإشارة الموجبة المستقبلية والمكونة من الإشارة الأصلية والضجيج على أنها ١ ، بينما فرنا السالبة على أنها ٠ ، فإن الرسالة المستقبلية الكلية ستكون من ر رقم ثنائي حسب ما يبدو في الشكل ٨ - ١ وستنحصر أخطاء الإرسال في المواقع : ٢ ، ٣ ، ٧ .

يتراوح تأثير الأخطاء هذه بين الانزعاج وخطر قلب مفهوم الرسالة وتنتجلى في حالة إرسال الأصوات أو الصور وباستخدام طرق الترميز

المبسطة بقرمطة وهسيس وبقع تلجة ، اما اذا كان ترميز التراكب هو المتبنى فيكون تأثير الاخطاء اكثر فداحة ، الا ان علينا ان نتوقع بشكل عام ان اخطار الاخطاء تقع في حالة ارسال النصوص..

يُتَجَنَّب وقوع الأخطاء عند إرسال النصوص بالطرق التقليدية ،
 بـوَرُود أحرف غير صحيحة هنا وهناك . يتميز النص بغزارته مما يسمح
 لنا بكشف الخطايا بالعين المجردة إلا أن هذه الأخطاء تصبح باهظة
 التكاليف في بعض الحالات مثل طبع نسخ الصحف بشكل متواقت في
 أماكن متباعدة باستخدام الإشارات الكهربائية .

تصبح الاخطاء خطرة في حالة ارسال الاعداد ، مثلا ان يتبدل العدد المال على مبلغ من المال من ١٠٠ الى ٩٠٠ ، أو ان تتغير بعض المقاطع من برنامج كومبيوتر او المعلومات المخزنة فيه ، تصبح اذ ذاك كل نتائج الكمبيوتر لا معنى لها .

ذهبنا في دراستنا أبعد من ذلك عندما بينا أن زيادة الفعالية في ترميز النصوص اللغوية أو غيرها بهدف تقليل الفزارة ، سيؤدي إلى زيادة الحساسية للاخطاء ، وبذا سيحرجي تضر عميق في معنى الاشارة المستقلة .

وإذا كانت الإخطاء بهذه الأهمية بالنسبة لنا ، فكيف لنا أن نحاشاها
تستند احدى الطرق على تكرار الاوسال كان نرسل كل حرف أو كل
رقم نثائي ممثل مرتين ، وهكذا فالإرسال بالسلسلة الثنائية 1.0.1.1.1
تكرر العمل مرتين ونحصل على :

X
خط

. ۱ . . ۱ ۱ ۱ ۱ ۱ ۱ . . . ۱ ۱	مرسل
۱ ۱ . . . ۱ ۱ ۱ ۱ ۱ ۱ . . . ۱ ۱	مستقبل

يؤدي هذا الأسلوب الى تخفيض سرعة الارسال حتى نصف قيمتها ،
اذ يتوجب علينا على الدوام التوقف وارسال كل رقم مرة ثانية . الا
اننا نستطيع ان نرى من خلال الإشارة المستقبلية الخطأ الواقع عند
النقطة المشار اليها ، فعوضاً عن وصول اشارتين متماثلتين .. او ١١ ،
نحصل على زوج غير متماثل : ٠١ ، ولكننا لا نستطيع تحديد الاشارة
الصحيحة الصادرة .. او ١٠ لقد اكتشفنا الخطأ ولم نستطيع تصحيحه .

اذا لم تكن الاخطاء متواترة ، أي اذا كان احتمال وقوع خطاين
عند ارسال ثلاثة ارقام متتالية مهماً ، يمكننا كشفه وتصحيح الخطأ
بارسال كل رقم ثلاث مرات ، حسب المثال التالي :

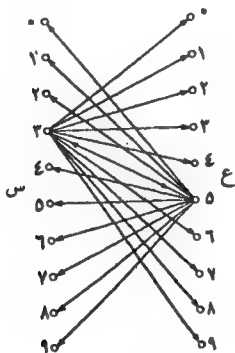
مرسل	١ ١ ١	٠ ٠ ٠	١ ١ ١	٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠	١ ١ ١ ١ ١ ١ ١
مستقبل	١ ١ ١	٠ ٠ ٠	١ ٠ ١	٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠	١ ١ ١ ١ ١ ١ ١
			↑		
			خطأ		

لقد خفضنا سرعة الارسال حتى الآن الى الثلث ، لاننا سنتوقف عند
كل ارسال مرتين بهدف تكرار ارسال الحرف ثلاثة مرات ، الا اننا
نستطيع تصحيح الخطأ استناداً لحقيقة ان الأرقام في الزمرة الثلاثية
١٠١ ليست متشابهة . فاذا فرضنا ان هناك خطأ واحداً في ارسال ارقام
هذه الزمرة ، لوجب ان تكون هذه الزمرة على الشكل ١١١ ، ممثلة لـ
١ وليست ٠٠٠، ممثلة لـ ٠ .

نجد هنا ان طريقة تكرار ارسال الأرقام كفيلة بكشف وتصحيح
الاطفاء القليلة الحدوث اثناء الارسال ، ولكن ما هي تكاليف هذه
الطريقة ؟ اذا استعملناها لكشف وتصحيح الاخطاء فستتخفيض سرعة
الارسال الى النصف اذا كررنا الارسال مرتين الى الثلث اذا كررناه
ثلاثة مرات ، كما ان هذه الطريقة تصبح عديمة الجدوى اذا كانت
الاطفاء متواترة لدرجة وقوع اكثر من خطأ واحد عند ارسال رقمين او
ثلاثة .

من الواضح أن هذه الطريقة لن تقود إطلاقاً إلى فهم صحيح لامكانية تصحيح الأخطاء . أن ما يلزمنا في هذا المجال أداة رياضية عميقة وفعالة لقد استطاع شانون الحصول على هذه الأداة من خلال اكتشافه وبرهانه لنظريته الأساسية عن القناة ذات الضجيج . وسنتبع فيما يلي أسلوب معالجته للموضوع .

سنعتبر حالة جملة اتصالات متقطعة حيث يتم إرسال زمرة من الأحرف أو الأرقام العشرية من . حتى ٩ ، وذلك بهدف الحصول على نموذج مجرد وعام للضجيج والأخطاء . ولتبسيط الأمر نعتبر مصدر إرسال يبعث الأرقام العشرية فقط ، وهذا ما يوضحه الشكل ٨ - ٢ .



الشكل ٨ - ٢

نجد على اليسار دوائر ربط بكل منها دليل رقمي ، نعتبر هذه الدوائر بمثابة مفاتيح ، وعلى اليمين يتوضع نظام مشابه ، نعتبر عناصره بمثابة اعضاء . وهكذا عندما نضغط زر على اليسار ييث احد الاضواء على اليمين توره .

إذا كلن نظام أرسلنا هذا خاليا من الضجيج ، فسيؤدي ضغط المفتاح الى اضاءة الضوء . وضغط المفتاح ١ الى اضاءة الضوء ١ وهكذا اما في حالة نظام ارسال غير كامل حيث يسود الضجيج فان ضغط المفتاح قد يؤدي لاشعال الضوء . مثلا او الضوء ١ او ل ضوء ٢ او اي ضوء آخر كما توضح الاسهم المنبعثة من المفتاح { في الشكل ٨ - ٢ . نصلح انه في حالة نظام الاتصال ذي الضجيج ، يكون اشعال احد الاضواء بسبب ضغط مفتاح معين هو قضية احتمالية محضة مستقلة عما جرى قبلها واننا اذا ضغطنا المفتاح { فيكون هناك احتمال مقداره ح (٦) بان الضوء ٦ هو الذي سيضيء .

إذا لم يكن المرسل واثقاً من الضوء الذي سينتج عند ضغطه مفتاح معين ، فإن المستقبل بدوره لن يستطيع تحديد المفتاح الذي ضغط عند مشاهدته النور من ضوء معين ، وهذا ماوضحه الإسهم المنطلقة من الضوء ٦ نحو مختلف المفاتيح على اليسار . إذا كان النور صادراً من الضوء ٦ ، فهناك احتمال مقدار ح (١) بأن يكون المفتاح ٤ هو المفتاح الذي ضغط وهكذا تتحقق في حالة نظام خال من الضجيج العلاقات :

$\therefore \text{ج} = (6) \quad \& \quad \text{د} = (9) \quad \therefore \text{ج} + \text{د} = 6 + 9 = 15$

سيزيد تقيد الشكل $\frac{1}{2}$ أو رسنا كل الأسهم المكنة وكذا
 سيزداد عدد الاحتمالات المدرجة ، ولكنني أعتقد أن درجة وطبيعة الرتبة
 لدى المستقبل عند محاولة المرسل بث حرف معين قد توضحاً بما فيه
 الكفاية ، وكذلك درجة وطبيعة الرتبة لدى المرسل عند تلقي المستقبل

لحرف معين . دعونا الآن نتناول موضوع قناة الاتصال ذات الضجيج بشكل أكثر شمولاً . لتحقيق هذا الهدف نصلح على استخدام الحرف س لتمثيل الاحرف المرسله والحرف ع لتمثيل المستقبل .

تشكل الاحرف س المجموعة المولدة من مصدر الإرسال . إذا كان عدد هذه الاحرف هو م وكان احتمال ورود كل منها مستقلاً عما سواه ومسويًا لـ $\frac{1}{M}$ ، تكون سرعة توليد المصدر للمعلومات أي الانتروبي الخاصة به كما تعلمنا سابقاً .

$$T(M) = \sum_{E=1}^M -\log_2 p(E) \times \log_2 p(E)$$

نعتبر خرج الجهاز ، والذي نصلح عليه بالحرف ع ، على انه مصدر رسائل آخر . لا يساوي عدد الاضواء عدد المفاتيح بصورة عامة ، إلا اننا سنفترض ذلك ، وهكذا سيكون هناك م ضوء ، وبدا تساوي انتروبي الخرج :

$$T(E) = \sum_{E=1}^M -\log_2 p(E) \times \log_2 p(E)$$

لنلاحظ انه بينما يعتمد $T(M)$ على دخل قناة الاتصال فقط ، يتوقف $T(E)$ على نفس الدخل وعلى اخطاء الإرسال إضافة لذلك ، وهكذا فاحتمال إنارة الضوء $\{$ في حالة قصر الإرسال على ضغط المفتاح $\}$ فقط يختلف عن احتمال إنارة الضوء $\{$ في حال ضغط المفاتيح بشكل عشوائي .

إذا افترضنا ان بإمكاننا مراقبة المرسل والمستقبل معاً ، لاستطعنا اكتشاف تواتر تركيب معين من س ، ع ، مثلاً كم مرة أدى إرسال $\{$ الى استقبال $\}$ ، لو إذا عرفنا الخصائص الاحصائية للمصدر والمستقبل لتمكننا من حساب هذه الاحتمالات ومنها نستطيع حساب انتروبي اخرى :

$$T(s, e) = \sum_{s=1}^r \frac{f_s}{e} - \sum_{e=1}^r \frac{f_e}{e} \times L(e, s) \quad (e)$$

وهي تمثل الرتبة في اقتران زوج معين s, e .

نذهب الآن أبعد من ذلك ؛ فنفرض أننا نعرف s ، أي أننا نعرف أي المفاتيح تم ضغطه ، ما هو احتمال اضاءة مختلف الاضواء في هذه الحالة ، كما يتوضح بالاسهم على يمين الشكل ٨ - ٢ . يقود ذلك الى الانتروبي التالية :

$$T(s) = \sum_{s=1}^r \frac{f_s}{e} - \sum_{e=1}^r \frac{f_e}{e} \times L(e, s) \quad (e)$$

وهي انتروبي شرطية للرتبة ، ويذكر شكلها بانتروبي الآلة المتناهية الحالات ، وكما في تلك الآلة ، نضرب الرتبة لحالة معينة (الحالة هنا قيمة s) باحتمال ان تلك الآلة ستحقق ثم نجمع عبر كل الحالات الممكنة.

نفرض اخيرا أننا نعرف أي الاضواء سيشتع . نستطيع لتحديد احتمالات ضغط مختلف المفاتيح ، وهذا بدوره يقود الى انتروبي شرطية اخرى :

$$T(s) = \sum_{s=1}^r \frac{f_s}{e} - \sum_{e=1}^r \frac{f_e}{e} \times L(e, s) \quad (e)$$

وهي عبارة عن المجموع لكل قيم e لاحتمال استقبال e مضروباً في الرتبة المقابلة لاحتمال ضغط المفتاح s عند تلقي الضوء e .

تتمتع كل حسابات الانتروبي هي على الخصائص الاحصائية للمصدر لانها تتوقف على تواتر ارسال او تواتر استقبال e ، كذلك على اخطا الارسل .

ان افضل تفسير لكميات الانتروبي المحسوبة اعلاه هو ذلك الذي يعتبرها ممثلة للريبة المرتبطة بتوليد الاحرف عند المصدر وتلقيها عند المستقبل ، وهكذا نثبت ما يلي :

ت (س) : الريبة بالنسبة ل س ، بمعنى اي الاحرف سيتم ارساله .

ت (ع) : الريبة المتعلقة بالعرف الذي سيتم استقباله في حالة اعتبار مصدر رسائل معين وقناة ارسال محددة .

ت (س ، ع) الريبة في حالة ارسال س ، واستقبال ع .
ت (ع) الريبة في استقبال ع عند ارسال س ، وهي متوسط الريبة بالنسبة للعرسل فيما يتعلق بالعرف الذي سيتم استقباله .

ت (س) الريبة في ارسال س عند استقبال ع ، وهي متوسط الريبة بالنسبة للمستقبل فيما يتعلق بالعرف الذي ارسل .

ترتبط هذه الكميات فيما بينها ببعض العلاقات :

$$ت (س ، ع) = ت (س) + ت (ع)$$

اي ان الريبة في حالة ارسال س واستقبال ع تساوي مجموع الريبة في س والريبة في استقبال ع عند ارسال س .

$$ت (س ، ع) = ت (ع) + ت (س)$$

اي ان الريبة في حالة ارسال س واستقبال ع تساوي مجموع الريبة في ع والريبة في ارسال س عند استقبال ع .

نلاحظ انه اذا سلوت ت (ع) للصفر فان ت (س) متساوي
 ص
 الصفر في نفس الوقت واذا ذلك تتساوى ت (س) مع ت (ع) ، وهذه
 هي حالة القناة بدون ضجيج حيث تتساوى انتروبي الاشارة المصدرة
 مع انتروبي الاشارة المستقبلية ، ويعرف المرسل اي الاحرف سيصل ،
 وكذا المستقبل يعرف اي الاحرف ارسل .

يبدو الرتبة ت (س) أي الرتبة في الحرف المرسل عند استقبال
 ع
 حرف معين ، كقياس طبيعي للمعلومات المفقودة عبر الارسال . هذا
 هو الواقع فعلاً ، لذا أعطيت هذه الانتروبي تسمية خاصة : الالتباس في
 قناة الاتصال . اذا اعتبرنا كل من ت (س) ، ت (س) كانتروبي مقدرة
 ع
 بالبيت في الثانية ، يمكننا ان نبرهن ان سرعة ارسال المعلومات عبر
 القناة هي :

$$\text{سر} = \text{ت (س)} - \text{ت (س) ع}$$

وهكذا تساوي هذه السرعة سرعة بث المعلومات من المصدر مطروحة
 منها الالتباس في القناة ، أي انتروبي المصدر مطروحة منها رتبة المستقبل
 فيما يتعلق بالحرف المرسل .

تساوي هذه السرعة أيضاً :

$$\text{سر} = \text{ت (ع)} - \text{ت (س) ص}$$

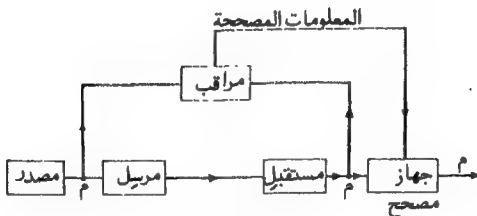
بتكلمة أوضح ، حاصل طرح رتبة المرسل فيما يتعلق بالحرف الواصل
 من انتروبي المستقبل .

وأخيراً تعطى هذه السرعة بالعلاقة :

$$\text{سر} = \text{ت (س)} + \text{ت (ع)} - \text{ت (س ، ع)}$$

اي مجموع انتروبي المصدر وانتروبي المستقبل مطروحا منه الزيادة في ارسال س واستقبال ع . نلاحظ انه من اجل قناة خالية من الضجيج يكون $(س، ع)$ مساويا للصفر الا في حالة $س = ع$ وبالتالي :
 $ت (س، ع) = ت (س) = (ع) = ع$ وتكون سرعة ارسال المعلومات هي نفسها انتروبي المصدر $ت (س)$.

يوضح شانون معنى هذه السرعة بالشكل ٨ - ٣ . نفرض هنا مراقبا يلاحظ الاشارة المرسل والمستقبلية ويقارن بينها ثم يرسل التصحيح المطلوب للاشارة المستقبلية . يبرهن شانون ان تصحيح الاشارة يستلزم تساوي انتروبي الاشارة المصححة مع الالتباس في القناة .



الشكل ٨ - ٣

نلاحظ ان سرعة ارسال المعلومات $(س)$ تعتمد على القناة وعلى المصدر . كيف نستطيع توصيف السعة الخاصة بارسال المعلومات في حالة قناة غير كاملة او ذات ضجيج . نستطيع اختيار المصدر بحيث تكون السرعة $س$ اكبر ما يمكن لقناة ارسال معينة . تدعى هذه القيمة المظلي بسعة القناة ، ونرمز لها برمز مناسب هو $س$.

تتضمن نظرية شانون للقناة ذات الضجيج السعة S ، وتنص على :
 نفرض مصدراً متقطعاً ذي انتروبي T وقناة إرسال متقطع سعتها S .
 إذا كانت $T > S$ ، نستطيع إيجاد نظام ترميز بحيث يمكن إرسال
 خرج المصدر عبر القناة بتواتر صغير جداً من الأخطاء أي بالالتباس
 صغير ، أما إذا كانت $T < S$ فيمكن عندها ترميز المصدر بحيث يكون
 الالتباس القناة أقل من $S - T$ ، حيث L عدد صغير جداً . لا توجد
 أي طريقة للترميز يمكنها جعل الالتباس القناة أقل من $T - S$.

هذه هي الصيغة التي أدعشت الرياضيين والمهندسين . كلما ازدادت
 احتمالات الأخطاء في الإرسال ، أي كلما تواترت الأخطاء ، انخفضت ، وفق
 شانون ، سعة القناة بشكل مطرد . مثلاً إذا اعتبرنا نظاماً مرسلًا للأرقام
 الثنائية وكان بعضها خاطئاً ، فإن سعة القناة S ، أي عدد وحدات
 البيت من المعلومات المقابلة لكل رقم ثنائي مرسل ، سيتناقص . إلا أن
 سعة القناة تتناقص كلما تواترت الأخطاء في بث الأرقام ، وهكذا فلن
 نبقى في حدود أقل ما يمكن من الأخطاء علينا انقاص سرعة الإرسال بحيث
 تكون مساوية لسعة القناة أو أقل من تلك السعة .

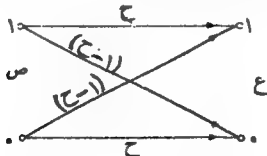
كيف نستطيع تحقيق هذه النتيجة ؟ نستذكر أن الترميز الفعال
 لمصدر معلوماتي يستلزم دمج عدد كبير من الأحرف مع بعضها وترميز
 الرسالة كمجموعة من التراكيب الطويلة . ينطبق هذا على الاستخدام
 الفعال للقناة ذات الضجيج ، إذ يجب أن نتعامل مع تراكيب طويلة من
 الأحرف المستقبلية ، بحيث يتألف كل تركيب من أكبر عدد ممكن من
 الأحرف . وما سيحدث ، هو أنه من بين كل التراكيب الممكنة ، سيقصر
 الإرسال والاستقبال على التراكيب التي يمكن أن ترد باحتمال غير مساو
 للفرق .

يبعث شانون ، بهدف برهانه نظريته المدرجة أعلاه ، من القيمة
 الوسطية لتواتر الخطأ لكل أساليب الترميز الممكنة ، أي لكل الارتباطات
 الممكنة بين تراكيب دخل وتراكيب خرج معينة ، وذلك عندما يتم انتقاء

الرموز بشكل عشوائي ، ثم يمضي شانون ليثبت أنه عندما تكون سعة القناة أكبر من إنتروبي المصدر فإن وسطي سرعة الخطأ مقدراً من أجل كل أساليب الترميز هذه يقترب من الصفر كلما ازداد طول التركيب . إذا استعملنا الحصول على هذه النتيجة الجيدة بعملية توسيط على كل طرق الترميز منتقاة بشكل عشوائي ، فلا بد أن واحدة من طرق الترميز هذه تفضي إلى هذه النتيجة الجيدة . لقد وصف أحد نظريي المعلومات طريقة البرهان هذه بكونها في منتهى الغرابة ، ولعلها كذلك لأنها لن تخطر على بال رياضي غير موهوب ، وربما أن الموضوع برمته ما كان ليخطر على بال رياضي غير موهوب أيضاً .

إن المعالجة السابقة لها صفة العمومية ، لذا فهي تنطبق على كل المسائل إلا أنني أعتقد أن العودة إلى مثال القناة الثنائية ذات الأخطاء سيأتي مزيداً من الإضاء على الموضوع ، وقد سبق أن بحثنا هذه القناة في الفصل العالي وأوضحها الشكل ٨ - ١ . لنر ما يمكن أن نقوله نظرية شانون من هذا المثال البسيط والشائع .

نفرض أن احتمال إرسال الـ ١ عبر القناة واستقباله . أيضاً هو C ، وهو نفس احتمال إرسال الـ ١ عبر القناة واستقباله ١ . وهكذا يكون احتمال استقبال الـ ١ بدلاً من الـ ١ المرسل واستقبال الـ ٠ بدلاً من الـ ١ المرسل هو : $(1-C)$. نفرض أكثر من ذلك أن كل هذه الاحتمالات لا تتوقف على الماضي ولا تتغير مع الوقت . يعطي الشكل ٨ - ١ التمثيل المجرد لهذه القناة كقناة ثنائية متناظرة (بنفس أسلوب الشكل ٨ - ٢) ، وقد غيرنا رمز الحرف المرسل إلى C .



الشكل ٨ - ١

تتحقق السرعة العظمى لارسال المعلومات عبر هذه القناة ، اي نصل الى سعتها ، اذا توفر مصدر ارسال يولد الرمز ١ بنفس احتمال توليد الرمز ٠ ، وذلك بسبب تناظر هذه القناة . وهكذا ففي حالة ص (١) وايضا في حالة ع بسبب التناظر) :

$$ح (١) = ح (٠) = \frac{1}{2}$$
ووفق ما تقدم :

$$ت (ص) = ت (ع) = - \left(\frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2} \right) \\ = ١ \text{ بيت لكل رمز}$$

ماذا عن الاحتمالات الشرطية والالتباس في القناة ؟ سنتهم في الانتروبي الشرطية أربعة حدود . المصادر والمساهمات هي :

احتمال استقبال ال ١ ، هو $\frac{1}{2}$. عندما يتم تلقي ال ١ ، يكون احتمال أن ال ١ هو المرسل مساوياً لـ ح ، واحتمال أن ال ٠ هو المرسل مساوياً لـ (١ - ح) . ان مساهمة هذه الاحداث في الالتباس هي :

$$\frac{1}{2} [- ح \log ح - (١ - ح) \log (١ - ح)]$$

اذا اعدنا هذه المناقشة من أجل احتمال استقبال ال ٠ ، نحصل على مساهمة في الالتباس مساوية للمساهمة الاخيرة .

وهكذا فمن اجل القناة الثنائية المتناظرة ، يسوي الالتباس مجموع هذه الحدود :

$$ت (ص) = - ح \log ح - (١ - ح) \log (١ - ح)$$
وتكون السعة :

$$س = ١ + ح \log ح + (١ - ح) \log (١ - ح) .$$

نلاحظ أن هذه السعة تساوي الواحد مطروحا منه التابع الموقع في الشكل ٥ - ١ . اذا كان $ح = \frac{1}{2}$ ، كانت $س = ١$ ، وهذا طبيعي لاننا اذا استقبلنا ١ في هذه الحالة ، يتساوى احتمال أن يكون الرقم المرسل ١ مع احتمال أن يكون الرقم المرسل ٠ ، وهكذا لا تساهم الرسالة المستقبلية في حل الرتبة المتعلقة بالرقم المرسل . كما يبدو من العلاقة

الآخيرة ان قيمة السمة هي نفسها من أجل $ح = ٠$ ، $ح = ١$. اذ ان الاستقبال الدائم لـ ١ في حالة ارسال الـ ١ ، والاستقبال الدائم لـ ١ في حالة ارسال الـ ٠ . سيجعل وثوقيتنا من المرسل في هذه الحالة مطابقة لوثوقيتنا به عندما نستقبل وبشكل مستمر الـ ١ الذي ارسال الـ ١ والـ ٠ لدى ارسال الـ ٠ .

اذا كانت القيمة الوسطية للخطا مساوية لرقم واحد من اصل كل عشرة ، انخفضت سعة القناة الى ٥٣ ٪ من قيمتها في حالة ارسال العاري من الخطا ، اما اذا كانت القيمة الوسطية ١ ٪ ، انخفضت السعة الى ٩٢ ٪ .

يعترف الكاتب عند هذه المرحلة ان بساطة النتيجة التي حصلنا عليها في حالة القناة الثنائية المتناظرة لها دور مفضل بالفعل ، فقد كانت مضللة بالنسبة للكاتب على الاقل . فاذا اعتبرنا قناة ثنائية غير متناظرة حيث احتمال استقبال الـ ١ في حالة ارساله هو ح بينما احتمال استقبال الـ ٠ في حالة ارساله هو احتمال مغاير ط ، وحاولنا حساب السرعة المثلى عبر القناة ، اي سعة القناة ، لوقعنا في ورطة فعلا . اما الاقنية الأكثر تمقيداً فتطرح مسائل قد تكون مستحيلة الحل .

هذا هو السبب في الاهتمام الكبير الذي اولى للاقنية الثنائية المتناظرة ، اضافة لاهميتها العملية . ماهو نوع الترميز الذي علينا تبينه كي نحقق ارسالاً عديم الاخطاء عبر هذه القناة . ذكر شانون في بحثه الاول الامثلة التي طرحها ر. و. هامينغ . نشر مارسيل ج. اي. جولاي عام ١٩٤٩ طرق الترميز المصححة للاخطاء ، بينما نشر هامينغ بحثه عام ١٩٥٠ . يجب ان نذكر ان هذه الامثلة قد صممت بعيد عمل شانون . ويمكن ان تكون قد خطرت لأصحابها قبل ذلك ، إلا ان بحث شانون في الارسال العاري من الاخطاء ، شجع العلماء على طرح التساؤل التالي : كيف لنا ان نحقق ذلك .

رأينا ان تحقيق التصحيح الفعال للاخطاء يتم اذا اعتبر المرمز سلاسل اطول من ارقام الرسالة . نفرض على سبيل المثال اننا نرمز ارقام رسالتنا في تراكيب مكونة من ١٦ رقم ونضع بعد كل تركيب ارقام ضابطة تمكن من اكتشاف خطأ وحيد سواء اكان في ارقام الرسالة او في الارقام الضابطة . نعتبر كمثال خاص الرسالة المكونة من سلسلة الارقام : ١١٠٠١٠٠١١٠٠١٠٠٠ . لايجاد الارقام الضابطة المناسبة نكتب هذه السلسلة في الجدول الموضح في الشكل ٨ - ٥ .

	٠	٠	١	١
١	١	١	٠	١
٠	٠	٠	١	١
٠	٠	١	٠	١
١	١	٠	٠	٠

الشكل ٨ - ٥

نربط بكل سطر او عمود من الجدول دائرة ، ثم نضع في داخل الدائرة . ١ او ٠ بحيث يصبح عدد مرات ورود ال ١ في السطر المعتبر او العمود زوجياً . نطلق على هذه الارقام اسم الارقام الضابطة . اذا عددنا عدداً مرات ورود ال ١ في كل سطر وكل عمود من مثالنا هذا بعد اضافة الارقام الضابطة ، نحصل على النتائج التالية :

الاعمدة معتبرة من اليمين الى اليسار : ٤ ، ٢ ، ٢ ، ٢

الاسطر معتبرة من الاسفل الى الاعلى : ٤ ، ٢ ، ٢ ، ٢

ماذا يحدث لو أرسل أحد الأرقام خطأ من أصل الرسالة المكونة من ١٦ رقم . سيصبح عدد مرات ورود ال ١ فردياً في أحد الأسطر وأحد الأعمدة ، وهذا يدفعنا لتبديل الرقم في الموقع حيث يتقاطع السطر والعمود المعنيين .

وماذا يحدث لو أن خطأ وقع في أحد الأرقام الضابطة . سيصبح عدد مرات ورود ال ١ فردياً في أحد الأعمدة . لقد اكتشفنا خطأ في هذه الحالة، إلا أنه لم يكن بين أرقام الرسالة .

ان مجموع الأرقام المرسله لرسالة مكونة من ١٦ رقم هو $16 + 8 = 24$ رقم ، وهكذا زاد عدد الأرقام المرسله بنسبة $\frac{24}{16} = 1.5$ لو بدانا برسالة مكونة من ٤٠٠ رقم لاحتجنا الى ٤٠٠ رقم ضابط ولكلت نسبة الزيادة في هذه الحالة : $\frac{440}{400} = 1.1$ ولكن بإمكاننا تصحيح خطأ من أصل ٤٤٠ رقم بدلاً من تصحيح خطأ من أصل ٢٤ رقم .

نستطيع تصميم أساليب ترميز أخرى بهدف تصحيح عدد أكبر من الأخطاء في تركيب من الأحرف المرسله . طبعاً إذا أردنا تصحيح عدد أكبر من الأخطاء لاحتجنا بالمقابل لعدد أكبر من الأرقام الضابطة . نعتبر ترميزاً آخر ، مهما كانت طريقة تصميمه ، يغطي إلى تراكيب عددها ٢ يتكون كل منها من م رقم ثنائي ، وهي تمثل كل التراكيب الممكنة في هذه الحالة والتي نرغب أيضاً بفرسالتها . سنحتاج في واقع الأمر إلى عدد أكبر من الأرقام الثنائية في كل تركيب لتغطية الحاجة من الأرقام الضابطة .

عندما نستقبل تركيباً معيناً من الأرقام ، يجب أن يكون بمقدورنا أن نستنتج منه أي التراكيب هو الذي أرسل فعلاً ، على الرغم من وقوع بعض الأخطاء فيه وبالعلاقة ن خطأ (استبدال عدد من حالات ورود ال ١)

ب . ، ، والمكس لا . يقول الرياضي ان ذلك ممكن لذا تكن البعد بين تركيبين متتالين يحتوي على الأقل على عدد من الأرقام الثنائية مساو ل (٢ + ن) .

لقد استخدم هنا مصطلح البعد بشكل غريب فعلاً ، بهدف تحقيق الفيات التي يسمى الرياضي اليها . نغني بالبعد هنا عدد الأرقام الثنائية في التركيب الأول التي يجب استبدالها كي نحصل على التركيب الثاني . مثلاً البعد بين ٠٠٠١٠٠ و ٠١١١١١ هو ٣ ذلك لأننا نحصل على أي من التركيبين باستبدال ٣ أرقام ثنائية في التركيب الآخر .

عندما نتركب عدداً من الأخطاء في الإرسال مقداره ن ، يكون البعد بين التركيب الذي نستقبله وذاك الذي أرسل مسلوياً ل ن ، وقد يكون التركيب المستقبل أقرب ب ن رقم من تركيب آخر . إذا أردنا أن نتأكد من كون التركيب المستقبل أقرب على اللغز من التركيب المرسل منه إلى أي تركيب آخر ، لوجب أن يكون البعد الأصغري بين أي تركيبين من نظام الترميز (٢ + ن) ١ ٠ .

نطرح اذن مسألة الترميز وفق تراكيب على النحو التالي : كيف يمكن أن نجد مجموعة من التراكيب عددها ٢^١ تركيب ، يحتوي كل منها على نفس العدد من الأرقام الثنائية ، وهو عدد يجب أن يكون أكبر من م ، بحيث يكون البعد الأصغري بين كل تركيبين مسلوياً ل (٢ + ن) ١ . يجب أن يتحقق إضافة لذلك كون التراكيب ذات طول أصغري .

برهنت طريقنا هامينغ ، جولاي أنهمما فعالتان ، كما أبدعت طرق ترميز فعالة أخرى .

نشير هنا إلى مشكلة أخرى في ترميز التراكيب ، هي وجوب كون الطريقة المعتمدة عملية الطلع خاصة فيما يتعلق بحل الرموز . ان مجرد إدراج الرموز المتنبأة لا يكفي ، فقد تكون اللائحة طويلة جداً . إن استخدام ٢٠ رقم ثنائي للترميز (٢ = ٢٠) سينجم عنه جدول يحتوي

بحدود مليون تركيب مختلف من الرموز. يعني هذا ان اكتشاف التركيب الاقرب للتركيب المستقبلي سيستغرق وقتاً طويلاً .

نزودنا النظرية الجبرية للترميز بوسائل ناجعة للترميز وحل الرموز وتصحيح العديد من الأخطاء . كان سليبيان هو السابق في هذا المجال ، ويمكننا ادراج عدد من أسماء المساهمين .وافق الطرائق التي ابتدعوها : رموز ويد - سولومون ، وايضاً رموز هوز - شوهوري . أما ألوين بريكامب فقد قدم أساليب رياضية جيدة لحساب التركيب الاقرب للتركيب المستقبلي .

تقدم طريقة الترميز الالتفافية واسطة أخرى لتصحيح الأخطاء ، نعتبر وفق هذه الطريقة الجزء الأخير من التركيب الثنائي الذي يرسل والمكون من م رقم ثنائي ونحفظه في خزان معلومات إضافي . كلما تمت تنفيذ رقم ثنائي جديد ، يرسل المرمز ٢ أو ٣ أو ٤ أرقام ثنائية ، وهذه الأرقام المرسلة تنتج من جمع الأرقام الثنائية في خزان المعلومات الإضافي ولكن بدون حمل من خانة لأخرى .

تعود هذه الطريقة أصلاً الى الياس ، إلا أن البحث الأول الذي نشر حول موضوع الترميز وحل الرموز أتى عام ١٩٥٨ من خلال تسجيل براءة اختراع لـ د. و. هاجيلبرجر . أما الاستخدام الأول للطريقة فقد بدأ عام ١٩٦٧ على يد أندريه. ج. فيتربي الذي اخترع طريقة مثلى وبسيطة لحل الرموز دميت باسم حل الرموز بأعظم احتمال ممكن .

لستخدام هذه الطريقة اليوم في الأقنية ذات المضجيج الهامة كإرسال الصور من مركبة فويجير عن المشتري وإتباعه . إن أهمية الطريقة تتجسد باستخدامها شدة وإشارة للنبضة المستقبلية .

إذا استقبلنا نبضة موجبة صغيرة فكلانما استقبلنا نبضة سالبة مع ضجيج ولا يعقل أن تكون نبضة موجبة مع ضجيج .. أما إذا استقبلنا نبضة موجبة كبيرة فالأرجح أنها نبضة موجبة مع ضجيج وليست نبضة سالبة مع ضجيج . نستخدم الطريقة المشار إليها هذه الملاحظات .

يستخدم الترميز في تراكيب بهدف حماية المعلومات ذات الأهمية المخزنة في الكمبيوتر . ويستخدم أيضاً في إرسال المعلومات عبر الأقنية ذات الضجيج المخفض .

تعرض معظم الدارات المستخدمة لنقل المعلومات الى اندفاعات طويلة من الضجيج . عندما يحدث ذلك ، تكون الطريقة المثلى في تصحيح الخطأ هي تقسيم الرسالة الى تراكيب من الأرقام واستخدام طريقة بسيطة لاكتشاف الخطأ . اذا اكتشف الخطأ في التركيب المستقبل ، يصبح عندها من المفضل إعادة إرسال التركيب .

يجد الرياضيون في طريقة الترميز بالتراكيب متعة وتحدياً في وقت واحد. لذا أصبحت نظرية المعلومات وفق بعضهم نظرية جبرية للترميز. ان نظرية الترميز غاية في الأهمية لنظرية المعلومات . لقد كانت نظرية المعلومات في بدايتها ، اي عند طرح عمل شانون ، أكثر شمولاً . يجب ان نعتبر ترميز المصدر وكذلك ترميز القناة في إطار موضوع الترميز .

بحثنا في الفصل السابع طرق التخلص من الفزارة بحيث يمكن بث الرسالة بعدد أقل من الأرقام . اما في هذا الفصل فقد رأينا كيفية إضافة سمة الفزارة الى رسالة تفتقر اليها بهدف تحقيق ارسال افتراضي خالٍ من الأخطاء عبر قناة ذات ضجيج . لقد اذهلت الرياضيين والمهندسين فكرة ان مثل هذا التحقيق ممكن ، اما شانون فقد برهن الفكرة واثبت انها قابلة التحقيق فعلاً .

سيكون المستقبل في رية ، قبل استلامه الرسالة الموثوقة عبر قناة خالية من الأخطاء ، عن الرسالة المعينة من مجموعة الرسائل الممكنة التي سيقوم المصدر بإرسالها فعلاً . ان قيمة هذه الرية هي سرعة اصدار المعلومات من المصدر او الانتروبي الخاصة به مقاسة بالبيت لكل رمز ولكل نانية . ستحل رية المستقبل هذه تملأ إذا تلقى نسخة مطابقة للرسالة التي بثت .

يمكن بث الرسالة بنبضات كهربائية سالبة وموجبة . إذا أضيف الى الرسالة ضجيج مؤلف من نبضات عشوائية سالبة وموجبة ، فيمكن أن تنقلب النبضات الموجبة سالبة والسالبة موجبة . إذا استعملت مثل هذه القناة للثبث فعلاً ، فسيكون هنا رتبة ما فيما يتعلق بالإشارة التي سيتلقاها المستقبل عند أوصال المصدر إشارة معينة .

عندما يتلقى المستقبل رسالة معينة عبر قناة ذات ضجيج ، فسيكون بالطبع على علم أكيد بما وصله ، إلا أنه لن يستطيع التأكيد بشكل كامل عن الرسالة التي صدرت فعلاً من الجانب الآخر ، أي المرسل . وهكذا فلن نحل الرتبة عنده حتى لدى وصول الرسالة إليه ، تعتمد الرتبة المتبقية على احتمال أن يكون الإشارة المستقبلية مخالفة للإشارة الصادرة .

إن رتبة المستقبل حول الرسالة الفعلية ، هي من وجهة نظر المرسل مجموع انتروبي أو رتبة مصدر الرسائل ورتبة المستقبل حول الرسالة الصادرة عند علمه الأكيد بالرسالة المستقبلية . يستخدم شانون كمقياس لهذه الرتبة الأخيرة ما يسميه الالتباس في القناة ، ويعرف سرعة إرسال المعلومات كحاصل طرح هذا الالتباس من انتروبي الرسالة .

تعتمد سرعة إرسال المعلومات على كمية الضجيج أو الرتبة في القناة ، وعلى طبيعة المصدر المرسل . نفترض أننا اخترنا مصدر للإرسال يؤمن لنا كمية عظمى بسرعة الإرسال ، نستخدم في هذه الحالة على تسمية القيمة العظمى المحققة بسعة القناة ذات الضجيج ونقيسها بالبيت لكل رمز أو البيت لكل ثانية .

إن مفهوم سعة القناة حتى الآن قد انحصر في كونه كمية رياضية معروفة يمكن حسابها إذا عرفنا احتمالات الأنواع المختلفة للأخطاء والممكنة في بث الرسائل . إلا أن هذا المفهوم ، أي مفهوم سعة القناة ، هو مفهوم علم للغاية ، لأن شانون يبرهن ، من خلال نظريته الأساسية عن الأتية ذات الضجيج ، أنه إذا كانت انتروبي المصدر أقل من سعة القناة ، فيمكن ترميز الرسائل التي يولدها المصدر بحيث يمكن بثها عبر القناة ذات الضجيج بخطأ صغير لا يتجاوز حداً معروفاً بشكل مسبق .

ان تحقيق بث الرسائل بدون أخطاء عبر اقنية ذات ضجيج ، يتطلب تجميع سلاسل كبيرة من الرموز ومزجها في رموز أكبر . هذا هو بالضبط ترميز التراكيب الذي واجهناه سابقاً ، إلا أننا خرج الى هدف آخر . فهنا لا نستخدمه للتخلص من غزارة الرسائل التي يسببها المصدر ، بل على العكس للزيادة في الغزارة بحيث نتمكن من بث الرسائل عبر الاقنية ذات الضجيج وبدون خطأ . ان جوهر مشكلة الاتصالات الفعالة والخالية من الأخطاء هو في واقع الأمر ، كيفية تخليص الرسائل من الغزارة غير الفعالة الموجودة فيها وإضافة عوضاً عنها غزارة من نوع ملائم تمكن من اكتشاف وتصحيح أخطاء الإرسال .

ان الأرقام المضافة لهذه الغاية ستبطل من سرعة الإرسال . لقد رأينا ان استخدام قناة ثنائية متناظرة يصل الى المستقبل عبرها رقم واحد غير صحيح من اصل ١٠٠ رقم مرسل ، يقيد نسبة بث الرسائل عبرها بقيمة ٩٢٪ . يعني ذلك وسطياً ، أن اعتبرنا رسالة مؤلفة من ٩٢ رقم وخالية من الغزارة ، يفرض علينا أن نضمنها ٨ أرقام إضافية ضابطة جاعلين بذلك مجمل دفع الأرقام غزيراً .

يلعب عمل شانون بالنسبة الىنا دور المرشد ، إلا ان الصعوبات الرياضية التي تواجهنا عند التعامل مع الاقنية المعقدة هي صعوبات جمة للغاية ، وحتى في حالة القناة الثنائية البسيطة المتناظرة والتي تعتمد القطع والواصل ، فإن مشكلة البحث عن الترميز الفعال هي مشكلة كبيرة جداً ، هذا على الرغم من أن الرياضيين قد أبدعوا عدداً كبيراً من طرق الترميز المتناظرة ، ولكن يا للأسف تبقى هذه الطرق بعورها صعبة التطبيق العملي .

هل يعني ذلك أننا نقدم صورة مشجعة ؟ انكم نحن اليوم أكثر حكمة بالقلونة مع الفترة السابقة لنظرية المعلومات ، إذ أننا نعرف ما هي المشكلة، ونعرف من حيث المبدأ ما الذي يجب علينا عمله، وقد ادعشت النتائج المهندسين والرياضيين . وأكثر من ذلك فيحوزنا طرائق فعالة للترميز ومصححة للأخطاء في نفس الوقت يمكن تطبيقها في مجالات متعددة أهمها بث صورة الكواكب الى الأرض من مركبات الفضاء البعيدة .

الفصل التاسع

حدة أبعاد

عُثِرَت منذ سنتين بميدة (حوالي ثلاثين سنة) في مكتبة سالت بول الصامدة على كتاب أطلعني على غوامض البعد الرابع . كلن عنوان الكتاب الأرض المسطحة مؤلفه آيوت ، وقد تناول بالوصف عالما ذي بعدين عديم السماكة . يمكن رسم هذا العالم وكل كائناته بكل تفاصيلها على صفحة من الورق .

لا أزال أذكر بمجب حتى الآن خصائص المجتمع في الأرض المسطحة، فالكائنات هناك مضلعة ، وعدد الأضلاع يشير الى الوضع الاجتماعي . تمنح أكثر الكائنات رفعة من بين الكائنات المتعددة الأضلاع مرتبة الدائرة . أما أقل الكائنات أهمية فهي المثلثات المتساوية الساقين ، أما المتساوية الأضلاع فهي أرفع بدرجة لأن الانتظام مطلوب ومحترم . وكانت ، في الواقع ، الأطفال غير المنتظمة تكسر ويعاد تشكيلها بانتظام ، وكانت هذه العملية في كثير من الأحيان مهلكة . أما الإناث في ذلك المجتمع فكانوا شديدي النحافة وأشبه بكائنات إيرية ، وقد انتزعن الإعجاب بمشيتهم المتمايلة . أما المربع فيتلام مع كل ما نبغي من ربط الأرض المسطحة به .

وللأرض المسطحة أخلاقياتها الرياضية أيضا . يندعش بطل الرواية عندما تظهر في ملله فجأة دائرة متغيرة المساحة ، فالدائرة هذه هي تقاطع كلن ثلاثي الأبعاد وهو الكرة مع الأرض المسطحة . تشرح الكرة أسرار

عالم الأبعاد الثلاثة للمربع الذي يبدأ بدوره القلم المواقظ عن المذهب
الغريب . يترك الكتاب قلوبه وقد سيطر عليه شعور بإمكانية أن يواجه
هو نفسه في أحد الأيام كائنًا متوجهاً متخفياً ، هو في واقع الأمر القاطع
كائن رباعي الأبعاد مع عالمنا الثلاثي الأبعاد .

تشكل الكميات الرباعية الأبعاد وما يماثلها من كرات وأشكال
هندسية أخرى مادة تقليدية لأبحاث الرياضيين وكتابات مؤلفي الخيال
العلمي . لتتخيل عالماً رباعي الأبعاد يشبه عالمنا الثلاثي الأبعاد ويضم بين
ثنياته عوالم كثيرة ثلاثية ، قريبة من بعضها كما صفحات المخطوطة ، إلا
أنها منفصلة ومختلفة بتشكيلاتها عن بعضها . ونبعد في خيالنا أكثر
بتصورنا إمكانية الانتقال من أحد هذه العوالم إلى عالم آخر عبر العالم
الرباعي الأبعاد المحيط ، فنصل مثلاً إلى أحشاء مريض لاستئصال
زائده الدودية .

لقد سمع الكثيرون منا أن أينشتاين قد استخدم الزمن كبعد رابع ،
كما سمع البعض من فريجات الأطوار المتعددة الأبعاد في الفيزياء حيث
تعتبر المركبات الثلاثة للموقع والمركبات الثلاثة للسرعة جميعها بمثابة
أحداثيات في عالم سداسي الأبعاد .

تختلف هذه المفاهيم ، على كل حال ، عن الفكرة الكلاسيكية للبعد
الرابع والذي يشبه تماماً الأبعاد المألوفة للمكان التي نعيشها ونعرفها
جيداً وهي أبعاد فوق وتحت ، يمين ويسار ، أمام وخلف . ترجع القضية
إلى رياضيي القرن التاسع عشر الذين نجحوا بتعميم الهندسة بحيث
تتضمن عدة أبعاد بل ولا نهاية من الأبعاد .

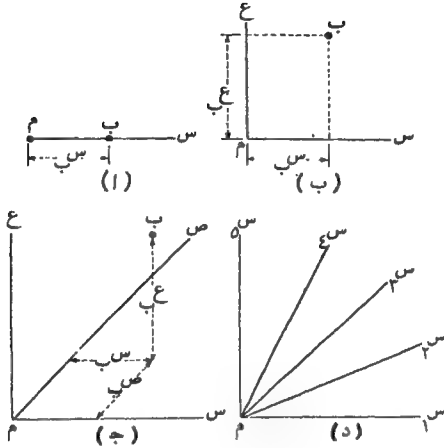
يقف الرياضي من هذه الأبعاد على أنها مجرد تشكيلات عقلية . يبدأ
بخط يحدوه اتجاه س أو محور السينات ، كما يوضح الشكل ٩ - ١ .
تقع نقطة ما - ب - على يمين مبدأ الإحداثيات م على محور السينات .
يحدد الإحداثي س ب في الحقيقة موقع النقطة ب .

بضيف الرياضي بمد ذلك خطاً آخر عمودياً على محور السينات هو محور العميات م ع ويستطيع تحديد موقع النقطة ب في عالم البعدين أو المستوي حيث يقع هذان المحوران باستخدام عددين أو إحداثيين : البعد عن النقطة م باتجاه المحور م ع ، أي الارتفاع ع ، ، والبعد من النقطة م باتجاه المحور م س ، أي البعد الأفقي للنقطة ب .

يوضح الشكل ٩ - ١ أيضاً حالة ثلاثة محاور من المفروض أن تكون متعامدة مع بعضها مثنى مثنى ، كما في حالة أحرف المكعب . تمثل هذه المحاور الفراغ الثلاثي الأبعاد الذي نميش ضمنه ، ويتحدد موقع نقطة ب بإحداثياتها الثلاثة س ب ، ص ب ، ع ب .

طبعاً المحاور الثلاثة كما هي واردة في الشكل غير متعامدة مع بعضها. فما نملكه هنا هو إسقاط منظوري من عالم الأبعاد الثلاثي الى عالم البعدين لمحاور ثلاثة هي في واقعها ضمن العالم الثلاثي الأبعاد متعامدة . يقدم لنا القسم الأخير من الشكل ٩ - ١ مسقطاً على عالم البعدين لمحاور الإحداثيات في العالم الخماسي الأبعاد . وقد غيرنا هنا المصطلحات قليلاً ، إذ أن ارتفاعنا في العوالم المتعددة الأبعاد سيستنفذ الأحرف الأبجدية بسرعة ، وهكذا عوضاً عن الإشارة الى الإحداثيات بالأحرف س ، ع ، ص ، أشرنا إليها بالرموز : س ١ ، س ٢ ، س ٣ ، س ٤ ، س ٥ ، تلمذاً كما يفعل الرياضيون .

مرة أخرى المحاور الخمسة ليست متعامدة في الشكل كما هي الحال في حالة المحاور الثلاثة ، كما أننا لا نستطيع رسم خمسة محاور متعامدة مثنى مثنى في فراغنا الثلاثي الأبعاد ، إلا أن الرياضي يستطيع التعامل مع مثل هذه المحاور المتعامدة بشكل عقلي ومنطقي . ويستطيع كذلك جرد الصفات المختلفة للأشكال الهندسية في الفراغ الخماسي الأبعاد حيث تحدد النقطة بإحداثياتها الخمسة :



الشكل ٩ - ١

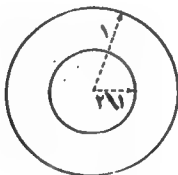
س^١اب ، س^٢اب ، س^٣اب ، س^٤اب ، س^٥اب . وإكمال المشبعة مع الفراغ العادي (الفراغ الإقليدي) يقول الرياضي أن مربع بعد النقطة ب عن مبدأ الإحداثيات م يُعطي بالملاقة :

$$م^2 اب = د^2 = س^2 اب + س^2 اب + س^2 اب + س^2 اب + س^2 اب$$

يعرف الرياضيون حجم المكعب في الفراغ المتعدد الأبعاد على أنه جلاء أضلاعه . وهكذا ففي الفراغ ذي البعدين ، المكعب المعني هو المربع ،

وحجمه في هذه الحالة هو مساحة المربع وتساوي لـ ٢ ، حيث ل هو ضلع المربع ، يصبح هذا الرقم لـ ٢ في الفراغ الثلاثي الأبعاد ، حيث ل هو ضلع المكعب المألوف . وفي حالة الفراغ الخماسي الأبعاد يعطي حجم المكعب ذي الضلع ل بالقيمة لـ ٥ ، وفي الفراغ ذي ٩٩ بعد يكون حجم المكعب بالقبول : لـ ٩٩ .

تتسم خصائص بعض الأشكال في الفراغات المتعددة الأبعاد بكونها سهلة إذا أردنا فهمها ، ومنهشة لذا أردنا اعتبارها . نعتبر على سبيل المثال الحلقة المبنية في الشكل ٩ - ٢ والتوليفة من دائرتين متمركزتين نصفي قطريهما : ١ ، ١ .



الشكل ٩ - ٢

ان مساحة الدائرة (الحجم في عالم البعدين) هي $\pi \times 1^2$ ، حيث ر هو نصف قطرها ، وبذلك تكون مساحة الدائرة الكبيرة π ومساحة الصغيرة $\frac{\pi}{4}$ ، وبمكنا يقع ربع المساحة الكلية داخل الدائرة الصغيرة .

نفرض ان الشكل ٩ - ٢ يمثل كرات ، يساوي حجم الكرة $\frac{4}{3}$

لا ٢ وهكذا يقع $\frac{1}{2}$ الحجم الكلي للكرة داخل الكرة الصغيرة التي نصف قطرها $\frac{1}{2}$. نعم ما تقدم بقولنا ، إن حجم الكرة في الفراغ ذي البعدن يتناسب مع r^3 ، لذلك فإذا اعتبرنا كرة في هذا الفراغ نصف قطرها $\frac{1}{2}$ ، فإن الجزء من حجمها الواقع داخل كرة متمركزة معها ونصف قطرها $\frac{1}{4}$ ، هذا الجزء من الحجم يساوي $\frac{1}{64}$ ، وهكذا إذا كنا في عالم سبلي الأبعاد أي إذا كانت $n = 7$ ، فإن هذا الجزء يساوي $\frac{1}{128}$.

نستطيع ان نعمم باتجاه آخر حيث نعتبر جزء الكرة ذات قطر r المحتوى في كرة متمركزة معها نصف قطرها r_0 . ر . نجد في حالة فراغ ذي ١٠٠٠ بعد أن هذا الجزء من الحجم هو ٠.٠٠٠٤ فقط . وهكذا نحن الآن نراه النتيجة التي لا مفر منها ، ألا وهي أنه في حالة كرة مغمورة في فراغ متعدد الأبعاد وعدد أبعاده كبير للغاية فإن كل الحجم تقريباً يقع بقرب السطح .

أوليست كل هذه الأفكار مجرد رياضيات بحثة ملائمة للنخبة فقط . نعم سيبقى هذا هو طابع هذه الأفكار إلى أن نربطها بمسائل العالم الفيزيائي . كان للأعداد التخيلية مثل $\sqrt{-1}$ نفس الوضع في يوم من الأيام ، إذ لم يكن لها أي قيمة فيزيائية ، ثم ما لبثت أن تسربت إلى العالم الواقعي فأصبح لها معانٍ فيزيائية وأخرى هندسية كهربائية . هل تتمكن من إيجاد حالة فيزيائية تنطبق عليها خصائص الهندسات المتعددة الأبعاد . نعم يمكننا ذلك ، وخاصة في نظرية الاتصالات . لقد استخدم شانون الهندسة المتعددة الأبعاد لبرهان نظرية هامة تتعلق بإرسال الإشارات المستمرة ذات الحزم المحددة وبوجود الضجيج .

يقدم لنا عمل شانون مثلاً رائعاً من استخدام وجهة نظر جديدة واستثمار نتائج فرع من الرياضيات لم يأخذ طريقه إلى التطبيق بعد (في هذه الحالة الهندسة المتعددة الأبعاد) وذلك لحل مشكلة ذات أهمية

عملية كبيرة . اقترح أن نمرج على جانب واسع من محاكمات شانون ، لأنها كما اعتقد تشكل مثلاً ممتازاً عن الرياضيات التطبيقية . إن تفاصيل هذه المعالجات الرياضية هي غير مألوفة أكثر من كونها صعبة ، وعلى القارئ أن يركب متنها على حسابه الخاص .

يجب أن نتبنى معياراً عاماً لشدة الإشارة والضجيج وذلك لتحقيق تناول أمثل لمسألة إرسال الإشارات المستمرة بوجود الضجيج . تثبت الطاقة أنها المعيار المناسب والمفيد في هذا المعرض .

عندما نبذل قوة مقدارها ١ كغ لمسافة ١ متر لرفع ثقل مقداره ١ كغ لارتفاع ١ متر نقول أننا قمنا بعمل متساوي قيمته ١ كيلو غرامتر ويصبح لدى الوزن بسبب الارتفاع قدرة تساوي ١ كيلو غرامتر . يمكن لهذا الوزن في حالة سقوطه أن يقدم عملاً مكافئاً لقدرته يستخدم مثلاً لإدارة جهاز ما .

تعرف الطاقة بأنها سرعة تقديم العمل . فإذا قدمت آلة ما عملاً مقداره ٦٠ كيلو غرامتر في الدقيقة ، كانت طاقتها ١ كيلو غرامتر في الثانية .

تستخدم الفيزياء وحدات معتمدة للقدرة والطاقة ، فوحدة القدرة هي جول ، ووحدة الطاقة هي واط ، ويساوي الواط جول واحد في الثانية .

إذا ضاعفنا الكون الكهربائي لإشارة ، نزيد إذ ذاك قدرتها وطاقاتها بأربعة مرات ، لأن الطاقة والقدرة كلاهما تتناسب مع مربع ذلك الكون .

وأينما في الفصل الرابع أنه يمكننا تمثيل الإشارة المستمرة بشكل كامل بعدد من العينات مساوٍ لـ ٢ س في كل ثانية إذا كان عرض حزامها س . وبالعكس يمكننا بناء إشارة مستمرة ذات حزام محلول تمر من ٢ س نقطة ممثلة لنفس العدد من العينات التي نختارها في كل ثانية .

نستطيع تحديد وتغيير كل عينة بشكل اختياري دون تغيير باقي العينات ،
ويترتب على ذلك تغيير الإشارة المحدودة الحزام .

نقيس ساعات العينات بالفولط ، وتمثل كل عينة قدرة متناسبة مع
مربع هذه السعة .

وهكذا نستطيع التعبير عن مربعات ساعات العينات بدلالة القدرة .
نقبل بأن القدرة تساوي مربع سعة العينة إذا تبينا وحدات خاصة
لقياس القدرة ، إن ذلك لن يسبب لنا أي متاعب إضافية .

نصطلح على تسمية ساعات العينات المتتالية والمنتقاة بشكل صحيح
من إشارة محدودة الحزمة والمقاسة ربما بالفولط ، بالتسميات :
س_١ ، س_٢ ، س_٣ ، الخ ، وستمثل القدرات القابلة تبعاً لذلك
بالرموز : س_١^٢ ، س_٢^٢ ، س_٣^٢ ، الخ . أما القدرة الكلية للإشارة
والتي نرمز لها بالرمز ق ، فتساوي مجموع قدرات العينات أي :

$$ق = س_١^٢ + س_٢^٢ + س_٣^٢ + الخ$$

نلاحظ أنه من وجهة نظر الهندسة المتعددة الأبعاد ، تساوي القدرة
ق مربع بعد نقطة من مركز الإحداثيات ، إذا كانت إحداثيات هذه النقطة
هي س_١ ، س_٢ ، س_٣ ، الخ .

وهكذا إذا مثلنا ساعات العينات من إشارة محدودة الحزام بإحداثيات
نقطة في فراغ متعدد الأبعاد ، كانت النقطة ذاتها ممثلة للإشارة الكاملة أي
كل العينات مأخوذة دفعة واحدة ، كما يمثل مربع بعد النقطة من مبدأ
الإحداثيات قدرة الإشارة الكاملة .

لذا ينبغي علينا تمثيل الإشارة بهذه الطريقة الهندسية ؟ السبب
هو أن شانون فعل ذلك لبرهان نظرية هامة في نظرية الاتصالات تتعلق
بتأثير الضجيج على إرسال الإشارات .

نستذكر النموذج الرياضي لمصدر الاشارات الذي تبينناه في الفصل الثالث عند محاولتنا البحث عن طريقة لتحقيق هذا الهدف . فقد فرضنا منذئذ ان المصدر ساكن ومستقر ، وما علينا هنا الا ان نسحب هذا الفرض على الضجيج المعبر وعلى جملة الاشارة والضجيج .

انه ليس امراً مستحيلاً من حيث المبدأ ان مصدراً كهذا سينتج الاشارة او الضجيج وفق تنال مديد من عينات عالية القدرة جداً او منخفضة القدرة جداً ، وليست الاستحالة هنا بأكثر من استحالة توليد مصدر مستقر لسلاسل احرف ابجدية يتواتر فيها الحرف E بكثرة . الواقع ان الامر هذا قليل الاحتمال وحسب . نتعامل هنا مع النظرية التي واجهناها لأول مرة في الفصل الخامس . يولد المصدر المستقر صنفاً محتملاً من الرسائل وصنفًا غير محتمل اطلاقاً لدرجة اننا نتمكن من اعماله . تنطبق حالة الرسائل غير المحتملة عندما تكون الطاقة الوسطية للعينات المنتجة بعيدة جداً عن المتوسط الزمني (ومتوسط المجموعة) المعبر للمصدر المستقر .

وهكذا فهناك طاقة متوسطة ذات معنى للاشارة في حالة كل الرسائل الطويلة التي علينا اعتبارها ، وهذه الطاقة المتوسطة غير متفجرة مع الوقت ونستطيع تحديدها باضافة القدرات لعدد كبير من العينات المتتالية ثم قسمة المجموع على الفترة الزمنية التي بشت خلالها هذه العينات . عندما نجعل هذه الفترة اكبر واكبر وعدد العينات اكثر واكثر ، تقترب من القيمة المتوسطة الصحيحة بشكل مطرد . ان الطاقة المتوسطة التي نحصل عليها بهذا الشكل ستكون هي نفسها بصرف النظر عن المجموعة المتتالية من العينات التي نعتبرها .

نستطيع اعادة صياغة ما تقدم في جمل مختلفة . لا يتغير مجموع قدرات عدد كبير من العينات المتتالية المنتجة من قبل مصدر مستقر الا في حدود طفيفة ومهملة ويبقى ثابتاً بصرف النظر عن المجموعة المينة من العينات المتتالية التي نعتبرها . ان هذا ينطبق على كل الحالات تقريباً باستثناء حالات نادرة بعيدة الاحتمال جداً .

تمكننا حقيقة كون المصدر من النوع المستقر من قول المزيد . ان قدرة نفس العدد الكبير من العينات المتتالية ستكون من وجهة النظر العملية هي نفسها ، بصرف النظر عن الاشارة المعنية التي يولدها المصدر ، كما تنخفض الفروق بين القدرات بلزدياد عدد العينات .

تمثل الاشارات المتولدة عن مصدر بنقاط في الفراغ المتعدد الأبعاد . نستعير من الاشارة التي عرض حزامها س ومدتها ز بعدد من العينات مساور ٢ س ز ، ونعتبر سعة كل عينة مقابلة لواحد من احداثيات هذا الفراغ . اذا كانت القيمة المتوسطة لقدرة كل عينة هي ق ، كانت قدرة كل العينات هي ٢ س ز ق اذا كان العدد س ز كبيراً بما فيه الكفاية . وايضا ان القدرة الكلية تمثل بعد النقطة الممثلة للاشارة من مبدأ الاحداثيات وهكذا عندما يزداد عدد العينات يكبر بالمقابل وبشكل تدريجي الحيز الذي تقع ضمنه النقاط الممثلة للاشارة المختلفة ذات المدد المتساوية والمنتجة من قبل المصدر ، أي تقترب تلك النقاط من سطح الكرة الكبيرة ذات نصف القطر : $2\sqrt{S Z Q}$ س ز ق ان وقوع هذه النقاط بقرب السطح لا يبدو غريباً اذا تذكرنا انه من أجل جسم متعدد الأبعاد يقع الحجم تقريباً بأكمله قرب السطح .

لا نستقبل الاشارة نفسها ، بل نستقبلها مضافاً اليها الضجيج . يطلق على الضجيج الذي يعتبره شانون اسم ضجيج غاوس الأبيض . تمكس كلمة الأبيض حقيقة احتواء الضجيج على كل التواترات على قدم المساواة ، ونفرض ان الضجيج يحتوي على التواترات حتى حد أعلى (س) ه ف ث ولا يحتوي تواتر أكبر من هذا الحد . اما كلمة غاوس فتشير الى قانون احتمال عينات ذات سمات مختلفة ، وهو قانون يصلح لعدة مصادر طبيعية للضجيج . تعتبر كل عينة من اصل هذا الضجيج الغاوسي ذي ال ٢ س عينة الممثلة له ، غير مرتبطة بسواها ومستقلة عنه . اذا عرفنا القدرة المتوسطة للعينات والتي ترمز لها ن ، فلن معرفة قدرات بعض العينات لا يسمح بمعرفة قدرات العينات الاخرى . ستكون في هذه

الحالة القدرة الكلية لعدد من العينات يساوي 2^2 س ز هي 2^2 س ز ن اذا كان العدد 2^2 س ز كبيراً وستكون القدرة هي نفسها تقريباً لأي متتالية من عينات الضجيج تضاف إلى عينات الإشارة .

رأينا ان متتالية معينة من عينات الإشارة يمكن تمثيلها بنقطة في الفراغ المتعدد الأبعاد بعد $\sqrt{2}$ س ز ق عن مبدأ الاحداثيات . اما النقطة المقابلة لمجموع الإشارة والضجيج فتتمثل بنقطة أبعد قليلاً من تلك الممثلة للإشارة . نرى في الواقع أن البعد بين النقطة الممثلة للإشارة والنقطة الممثلة لمجموع الإشارة والضجيج هو $\sqrt{2}$ س ز ن وهكذا تقع النقطة الممثلة لمجموع الإشارة والضجيج في كرة صغيرة متعددة الأبعاد مركزها النقطة الممثلة للإشارة ونصف قطرها $\sqrt{2}$ س ز ن .

اننا لا نلتقي الإشارة فقط ، فنحن نلتقي إشارة قدرتها الوسطية ق لكل عينة مع ضجيج غاوسي قدرته الوسطية ن لكل عينة . وتكون القدرة الكلية المستقبلية خلال فترة زمنية مقدارها ز : 2^2 س ز (ق + ن) وتقع النقطة الممثلة لمجموع الضجيج والإشارة في كرة متعددة الأبعاد نصف قطرها $\sqrt{2}$ س ز (ق + ن) .

بعد استقبالنا للإشارة والضجيج خلال ز ثانية نستطيع إيجاد النقطة الممثلة للإشارة والضجيج . ولكن كيف نستطيع ترشيح الإشارة والحصول عليها على حدة ، كل ما نعلمه أن الإشارة تقع على بعد $\sqrt{2}$ س ز ن من النقطة الممثلة لمجموع الإشارة والضجيج .

كيف نتأكد من استنتاج أي الإشارات هي التي أرسلت ؟ نفرض أننا نضع داخل الكرة المتعددة الأبعاد ذات نصف القطر $\sqrt{2}$ س ز (ق + ن) عدداً كبيراً من كرات صغيرة متعددة الأبعاد وغير متداخلة مع بعضها وذات أنصاف أقطار أكبر بقليل من $\sqrt{2}$ س ز ن . تكفي بعد ذلك بإرسال الإشارات الممثلة بمراكز هذه الكرات الصغيرة .

عندما نستقبل عدداً من العينات ٢ س ز من أي من هذه الاشارات مضافاً اليها عينات الضجيج ، فإن النقطة المقابلة في الفراغ المتعدد الأبعاد ستقع داخل الكرة المتعددة الأبعاد الصغيرة المعنية المحيطة بالنقطة المثلثة للإشارة المعتبرة وليس ضمن أي كرة أخرى . وسبب ذلك ، انه كما رأينا في حالة سلاسل العينات الطويلة المنتجة من قبل مصدر ضجيج مستقر ، تقع النقطة المثلثة لهذه العينات تقريباً على سطح كرة نصف قطرها $\sqrt{2} \text{ س ز ن}$. وهكذا يمكن تمييز الاشارة المرسله ودون خطأ رغم الضجيج .

ما هو عدد الكرات المتعددة الأبعاد وغير المتداخلة ذات أنصاف الأقطار $\sqrt{2} \text{ س ز ن}$ التي يمكن وضعها داخل كرة نصف قطرها : $\sqrt{2} \text{ س ز (ن + ق)}$. ان هذا العدد لا يمكن أن يتجاوز بحال من الاحوال نسبة حجم الكرة الكبيرة الى احدى الكرات الصغيرة .

تحدد أبعاد الفراغ المعتبر بعدد عينات الإشارة والضجيج ٢ س ز . يتناسب حجم كرة في فراغ متعدد الأبعاد مع $ر^٢$ ، حيث ر هو نصف قطر الكرة و م ابعاد الفراغ . وهكذا تكون نسبة الكرتين المذكورتين :

$$\left(\frac{\sqrt{2} \text{ س ز (ن + ق)}}{\sqrt{2} \text{ س ز ن}} \right)^2 = \left(\frac{\text{ق + ن}}{\text{ن}} \right) \text{ س ز}$$

يشكل هذا العدد حداً لعدد الرسائل المختلفة التي يمكن ان نبثها خلال الفترة الزمنية ز . اما لو غاربتم هذا العدد فهو عدد واحدات البيت التي يمكن ان نرسلها .

$$\text{س.ز. ل.ع.} \left(\frac{\text{ق + ن}}{\text{ن}} \right)$$

يساوي التالي عدد واخداث البيت في كل ثانية

$$ص = م (١ + \frac{ق}{ن})$$

يتيح لنا وصولنا الى هذه المرحلة ، ملاحظة ان نسبة متوسط القدرة لكل عينة من الإشارة الى متوسط القدرة لكل عينة من الضجيج يجب ان تساوي نسبة الطاقة الوسطية للإشارة الى الطاقة الوسطية للضجيج ، وهذه النسبة الأخيرة تساوي النسبة $\frac{ق}{ن}$ الواردة في العلاقة الأخيرة .

بينت المناقشة السابقة انه لا يمكن ارسال أكثر من ص بيت في كل ثانية في حالة حزام عرضه (س) هـ ف ث وباستخدام إشارة طاقاتها ق ممزوجة بضجيج طاقته ن . ذهب شانون أبعد من ذلك مستخدماً حقيقة ان حجم الكرة المتعددة الأبعاد محتوى بأكمله تقريباً قرب السطح ومبيناً بالتالي ان سرعة اصدار الإشارات تقترب من القيمة ص في العلاقة السابقة بقدر ما نريد وبعدد صغير من الأخطاء وفق ما نرغب . وهكذا فالقيمة ص في العلاقة الأخيرة هي سعة القناة في حالة قناة مستمرة أضيف ضجيج غاوسي الى الإشارة عبرها .

سنعمد الى مقارنة العلاقة الأخيرة مع علاقات سرعة الارسال والمعلومات التي اقترحها نيكويست وهارثلي عام ١٩٢٨ والتي شرحناها في الفصل الثاني . يذهب نيكويست وهارثلي الى ان عدد الأرقام الثنائية التي يمكن ادخالها في كل ثانية هو : ل لع م ، حيث م هو عدد الرموز المختلفة ، ول هو عدد الرموز المرسلة في كل ثانية .

ان أحد أنواع الرموز التي يمكننا ان نعتبرها هو قيم معينة للكمون الكهربائي : $٣ + ، ١ - ، ١ - ، ٣ -$. لقد كان نيكويست على علم ، مثلنا نحن الآن ، بان عدد العينات المستقلة أو قيم الكمون التي يمكن

ارسالها في كل ثانية هو ٢ م ، باستخدام هذه الحقيقة يمكننا اعادة كتابة العلاقة الاخيرة على الشكل :

$$ص = \frac{ل}{٢} \text{ لع } ١ + \frac{ق}{٥}$$

$$ص = ل \text{ لع } \sqrt{١ + \frac{ق}{٥}}$$

اننا هنا نعيد تقفي آثار الخطوات التي قادتنا الى ص ، وقد وصلنا في العلاقة المعبرة عنها الى العدد الوسطي م للرموز المختلفة التي يمكننا ارسالها بكل عينة ، وذلك بدلالة نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج . اذا نقصت طاقة الاشارة أو زادت بالمقابل طاقة الضجيج بحيث قربت النسبة $\frac{ق}{ن}$ من الصفر ، فان القيمة المتوسطة لعدد الرموز المختلفة التي يمكننا ارسالها في كل عينة تقترب أيضاً من الصفر ، لان لع ١ = ٠ ، ويستتبع ذلك أن سعة القناة ص في هذه الحالة تقترب من الصفر أيضاً ، وعلى العكس تزداد بشكل مطرد القيمة المتوسطة المشار اليها وسعة القناة اذا زدنا النسبة $\frac{ق}{ن}$ اي نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج .

لقد تعاطف فهمنا لكيفية ارسال عدد متوسط كبير من الرموز المستقلة بكل عينة باكثر مما علمنا نيكويست أو هارتلي . نحن نعرف الآن أن تنفيذ ذلك بشكل فعال يقتضي بشكل عام ألا نحاول اجراء عملية الترميز لرمز واحد كمينة مكون كهربائي محددة ومعدة للارسال بذاتها . على العكس يجب علينا على الدوام اللجوء الى ترميز التراكيب بحيث ترمز سلسلة طويلة من الرموز باستخدام مجموعة كبيرة متتالية من العينات . وهكذا اذا كانت نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج هي ٢٤ ، نستطيع ارسال عدد من الرموز المختلفة بكل عينة مساو $\sqrt{٢٤ + ١} = \sqrt{٢٥} = ٥$ بشكل وسطي ، إلا أننا لا نستطيع ارسال ٥ رموز مختلفة بواسطة عينة محددة .

أوضحنا في الشكل ٨ - ١ من الفصل الثامن كيفية إرسال الأرقام الثنائية بمعدل رقم واحد عند كل لحظة وبوجود الضجيج وذلك باستخدام إشارة موجبة أو سالبة ذات سعة معينة ، اصطلاحنا على ربطها بالرقم ١ إذا كان مجموع الإشارة والضجيج موجباً ، وربطها بالرقم ٠ إذا كان هذا المجموع سالباً . نفرض أننا نستطيع تقوية الإشارة بمقدار كافٍ بالمقارنة مع الضجيج الذي نفرضه غاوسي ، بحيث تكون نسبة الأرقام المستقبلية الخاطئة $\frac{1}{10000}$. تشير الحسابات إلى أن ذلك يستدعي ستة

أضعاف طاقة الإشارة مع الحفاظ على نفس عرض الحزام وطاقة الضجيج . نتجم حاجتنا للطاقة الإضافية من أننا نستخدم لتمثيل الإشارة نبضة قصيرة إما موجبة أو سالبة مقابل رقم ثنائي واحد ولا نستخدم إحدى الإشارات الطويلة المؤلفة من عدة عينات مختلفة ذات سعات متباينة مقابل عدة أرقام ثنائية متتالية .

أما في حالة طاقة وسطية منخفضة للإشارة وطاقة عالية للضجيج ، فإن إحدى الطرق الخاصة لتحقيق سرعة مثالية في الإرسال أو الوصول إلى سعة القناة ، تتجسد بتركيز طاقة الإشارة في نبضة قصيرة وقوية وإرسال تلك النبضة في إحدى اللحظات الزمنية التي تمثل منها رمزاً مختلفاً . نستطيع في هذه الحالة الخاصة وغير العادية أن نرسل وبشكل فعال الرموز بمعدل رمز عند كل لحظة .

إذا رغبتنا تحقيق حد شانون من أجل عرض حزام معين ، فيجب أن تكون عناصر الترميز إشارات موجبة معقدة طويلة أشبه بالضجيج الفلأوسكي .

نستطيع أن نغير نظرتنا إزاء لعلاقة الأخيرة التي أعطتنا قيمة ص ، فبدلاً من أن نتناولها من المنظور الضيق الذي تقدمه لنا من خلاله عدد وإحداثيات البت في الثانية التي يمكننا إرسالها عبر قناة اتصال معينة ،

نترجمها وفق منظور آخر نطلعنا بموجبه عن امكانيات ارسال اشارة ذات عرض حزام معين وقيمة مطلوبة للنسبة $\frac{ق}{ن}$ اي نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج عبر قناة ارسال معينة لها بالمقابل عرض حزام ونسبة مختلفين . نفرض مثلاً ان نسبة $\frac{ق}{ن}$ هي ١٠٠٠ ، وعرض الحزام ٤ مليون هزة في الثانية ، عندها تكون سعة القنال ص :

$$ص = ٤٠٠٠٠٠٠٠ \text{ بيت في الثانية}$$

يمكن ان نصل الى نفس سعة القنال هذه ، بقيم مختلفة للنسبة وعرض الحزام وفق الجدول المثالي التالي :

عرض الحزام س	النسبة $\frac{ق}{ن}$
٤٠٠٠ ٠٠٠	١٠٠٠
٨٠٠٠ ٠٠٠	٣٠٠٦
٢٠٠٠ ٠٠٠	١٠١٠٠ ٠٠٠

يوضح هذا الجدول أنه لتحقيق سعة قناة معينة اما ان نستخدم حزام اعرض ونسبة اخفض ، او نستخدم حزام أضيق ونسبة اكبر .

ادهشت العاملين الاوائل في نظرية المعلومات فكرة تخفيض عرض الحزام في مقابل زيادة الطاقة المستخدمة ، اذ ان هذا يستدعي كمية كبيرة من الطاقة . اثبتت الخبرة انه من المفيد والعملي ان نزيد عرض الحزام بحيث نحصل على قيمة جيدة لنسبة الطاقة الى الضجيج باستخدام طاقة اقل مما قد يلزم في احوال اخرى .

ان هذا هو ما يتم فعله ، على سبيل المثال ، في ارسال التواتر المعدل ففي هذا المثال تعتبر سعة معينة للاشارة التي ستُرسل ، كالوسيقى مثلا

وترمز كل إشارة راديو ذات تواتر معين . يؤدي الزدياد وتقصان سعة الإشارة المرسلة الى تغير كبير جدا في تواتر الإشارة المعدلة المثلة لها وهكذا فبالرسل إشارة موسيقية عرض حزامها ١٥٠.١٠ هــفت ان استخدام ارسال التواتر المعدل لحزام اكثر عرضا من الموسيقى التي يمثلها ، يفضي الى نتيجة مفادها ان نسبة الإشارة الى الضجيج في الموسيقى المستقبلية ستكون اكبر بكثير من نسبة طاقة الإشارة الى طاقة الضجيج في الإشارة ذات التواتر المعدل التي تصل الراديو ان طريقة تعديل التواتر لا تشكل نظاما فعلا نموذجيا ، إذ انها لا تستجيب للتحسينات التي تضيفها العلاقة الأخيرة لسعة القناة ص .

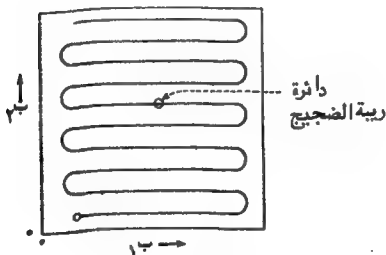
يتابع مابقة الاتصالات وبشكل مستمر اختراع أنظمة تعديل محسنة وقد اقترح علي بعضهم واكثر من مرة أنظمة جديدة تحقق ما هو افضل من علاقة سعة القناة ص الأخيرة ، ووفق ما تسمح به السعة المثالية للقناة . كانت كل الاقتراحات معقولة من حيث المبدأ ، الا انني كنت أعلم ان شيئا ما غير صحيح ، تماما كما في حالة الآلات الدائرية الحركة . لقد اظهر التحليل الثاني مكان الخطأ . وهكذا تطلعنا نظرية الاتصالات على ما لا يمكن انجاهه وتقتصر الممكن كذلك .

الا ان هناك شيئا واحدا لا يمكن تحقيقه فيما يتعلق بتحسين نسبة الإشارة الى الضجيج خاصة اذا زدنا عرض الحزام ، أما هذا المستحيل فهو ان نحقق نظاما بإمكانة التصرف بشكل منتظم ومتجاوب لكل القيم المختلفة لنسبة طاقة الإشارة الى طاقة الضجيج .

ربطنا في مطلع هذا الفصل الإشارة بنقطة في فراغ متعدد الأبعاد حيث يساوي عدد هذه الأبعاد عدد العينات المعتبرة . ان ارسال إشارة ذات حزام ضيق فيها عدة عينات باستخدام إشارة ذات حزام عريض فيها عدد اكبر من العينات يعني ان ننفذ عملية ارسام من نقاط فراغ متعدد الأبعاد الى نقاط في فراغ آخر متعدد الأبعاد ذي عدد اكبر من الأبعاد وان يكون هذا الأرسام من نوع واحد - لواحد .

برهنا في الفصل الاول نظرية تتعلق برتسام نقاط من فراغ ثنائي الابعاد (مستوي) الى تقاطع من فراغ احادي الابعاد (مستقيم) . وذكرنا في ذلك المعرض اننا اذا نقلنا ارتسام كل نقطة من المستوى الى نقطة وحيدة مقابلة على المستقيم ، فان الارتسام لا يمكن ان يكون مستمرا ، ومعنى ذلك اننا اذا تحركنا بشكل مستمر وناعم عبر مسار في المستوى من نقطة الى نقطة مجاورة ، فان المرسم المقابل على المستقيم سيتحدد بقفزات الامام والخلف . تنطبق هذه النظرية حرفا بحرف على كل الارتسامات من تقاطع فراغ الى نقاط فراغ آخر مختلف الابعاد . يمكن لهذه الحقائق ان تعطي كل المتاعب في انظمة الارسل حيث يمثل عدد قليل من عينات الرسالة بعدد اكبر من عينات الاشارة .

يعطي شانون مثالا بسيطا على هذا النوع من المتاعب والوضع في الشكل ٩ - ٣ .



الشكل ٩ - ٣

نعرض اننا نستخدم عينتين من السعات : ب١ ، ب٢ لتمثيل سعة وحيدة ح . نعتبر ان الكميتين ب١ ، ب٢ كاحداثيتين كما هو موضح

نرسم داخل المربع خطا متلويا يبدأ بقرب الزاوية السفلى اليسارية ويندرج في الصعود نحو الأعلى . نصلح على أن البعد مقاسا على هذا الخط هو ح كمون او سمة الإشارة التي سترسل ، على أن يجري القياس بدءا من اول الخط وحتى نقطة معينة منه .

تقابل اي قيمة معينة ل ح قيمتين ب_١ ، ب_٢ . نلاحظ ان مجال ب_١ و ب_٢ أصغر من مجال ح . نستطيع ان نرسل ب_١ ، ب_٢ ، ثم نستعيد بدقة بالغة ، او لا نستطيع ذلك ؟

نفرض أن قليلا من الضجيج قد تسرب الى ب_١ و ب_٢ ، بحيث اننا اذا أردنا تحديد ح عند المستقبل فسنجد انفسنا في دائرة من الريبة بسبب الضجيج اذا كان قطر الدائرة أقل من البعد بين لفات التماس المنحني نستطيع تحديد القيمة الصحيحة ل ح بخطا أقل بكثير من الخطا في كل من ب_١ ، ب_٢ ، اما اذا كان الضجيج أكبر ، عندها لن نستطيع التأكد من لغة المنحني التي تقع عليها ح ، وبهذا سنرتكب خطا أكبر في تقدير ح .

يبدو انه لا مفر من هذا السلوك في الانظمة المشابهة لنظام تعديل التواترات حيث يستخدم حزام عريض بهدف الحصول على قيمة أجود لنسبة الإشارة الى الضجيج .

عندما يزداد الضجيج المضاف الى الارسل ، يزداد بدوره وبشكل تدريجي الضجيج في الإشارة المستقبلة ، الا انه لا يلبث أن يزداد على قفزات وبشكل كارثي . يقال عند هذه النسبة للإشارة الى الضجيج ان نظام الارسل قد اكسر . وها نحن امام مثال تطلعا من خلاله نظرية رياضية مجردة ان هناك سلوكا معيناً لا يمكن تحاشيه في انظمة الاتصالات الكهربائية بصورة عامة .

لقد كان التناول في هذا الفصل هندسيا بشكل اساسي . وهذه هي إحدى طرق معالجة الإشغالات المستمرة ، وفي الواقع يعطي شاتون في كتابه من نظرية الاتصالات طريقة أخرى قليلة التطبيق لكل انواع

الاشارات والضجيج وتبقى للطريقة الهندسية أهمية خاصة ، اذ تثبت هذه الطريقة انها مثمرة وفعالة في عدة مسائل ذات صلة بالاشارات الكهربائية التي ليست من صلب نظرية الاتصالات .

وصلنا هنا الى هندسة للاشارات المحدودة الحزام بانتقاء عينات الاشارات ومن ثم اعتبار سمات العينات كاحداثيات نقطة في فراغ متعدد الأبعاد . الا انه من الممكن ان نصب الاشارات محدودة الحزام في قالب هندسي دون اللجوء الى العينات ، وقد حقق ذلك فعلا الرياضيون المهتمون بمسائل ارسال الاشارات . لقد اصبح من المعتاد تمثيل الاشارات المحدودة الحزام كنقاط في فراغ اشارات متعدد الأبعاد او فراغ توابع ومن ثم برهان النظريات المتعلقة بالاشارات بتطبيق اساليب الهندسة . ان للتمثيل الاخير أهمية كبرى اذ يمكن الرياضيين من استنباط وصيغة قضايا صحيحة تغطي كل الاشارات المحدودة الحزام او كل صنف الاشارات المحدودة الحزام ، دون اعتبار التفاصيل المضللة لاشارات معينة ، تماما كما يفعل الرياضيون لدى صياغتهم قضايا صحيحة عن كل المثلثات او كل المثلثات القائمة . ان فراغ الاشارات هو أداة قوية بين ايدينا ، او بالأحرى بين عقول الرياضيين المبدعين ، وكل ما نستطيعه ان نمجّب ونتمجّب .

كانت مهمتنا الرئيسية في هذا الفصل ، من وجهة نظر نظرية الاتصالات ، ان نبرهن نظرية تتعلق بقناة مستمرة ذات ضجيج . لقد تضمنت العلاقة الأخيرة لسعة القناة من هذه النظرية ، حيث أعطت العلاقة المذكورة السرعة التي يمكننا وفقها ارسال الارقام الثنائية بأقل ما يمكن من الاخطاء عبر قناة مستمرة حيث تمزج اشارة عرض حزامها س وطاقاتها ق مع ضجيج غاوسي ابيض عرض حزامه س وطاقته ن .

كان نيكويست منذ عام ١٩٢٨ على علم بإمكانية ارسال عدد مستقل من الرموز مساو لـ ٢ س في كل ثانية عبر قناة عرض حزامها ٢ س ، الا انه كان يجهل عدد الرموز المختلفة التي يمكن ارسالها في كل ثانية من اجل نسبة معينة لطاقة الاشارة الى طاقة الضجيج . اما نحن فقد

حسبنا ذلك العدد لعالة معينة وشائعة من الضجيج ، وكذلك استطعنا ان نعرف ان امكان ارسال عدد وسطي من الرموز م لكل عينة في الثانية لا يعني نجاح المحولة بترميز الرموز المتتالية بشكل مستقل ككمونات محددة ، على العكس يجب ان نستخدم ترميز التراكيب ، حيث يتم ترميز عدد كبير من الرموز المتتالية دفعة واحدة .

تؤكد علاقة سعة القناة ص امكانية استخدام اشارة ذات حزام عريض ونسبة ضئيلة للاشارة الى الضجيج لتحقيق بث رسالة ذات حزام ضيق ونسبة عالية للاشارة الى الضجيج ، وابرع مثالي عملي على ذلك هو تعديل التواتر . سنعود الى متابعة هذه الاعتبارات في الفصل العاشر .

كان لهذا الفصل جانب آخر ، فقد اوضحنا فيه استخدام أفكار جديدة وتطبيق اداة رياضية قوية في حقل نظرية الاتصالات . لقد حققنا علاقة سعة القناة ص بتطبيق حيلة بارعة وغامضة الى حد ما هي تمثيل الاشارات الكهربائية الطويلة والضجيج المضاف اليها بنقاط في فراغ متعدد الابعاد . واصطلاحنا على ان يكون مربع بعد النقطة عن مبدأ الاحداثيات في الفراغ المتعدد الابعاد هو طاقة الاشارة التي تمثلها النقطة .

وهكذا اخترلنا مسألة في نظرية الاتصالات الى مسألة مقابلة في الهندسة ، ووصلنا الى النتائج المرجوة بمناقشات هندسية محضة . ولعلنا نلاحظ ان التمثيل الهندسي للاشارات قد أضى اداة رياضية فعالة في دراسة الاتصالات وخصائص الاشارات .

ان اختزال مسائل الاشارات الى الهندسة هو عمل مهم بعد ذاته وهو مثال حي من قيمة البحث عن وسائل رياضية متجددة تتناسب مع التقدم المتزايد للمسائل التي يطرحها تطور التكنولوجيا المتصلد . وكل ما نأمل ان نطبق هذا النظام في التفكير على كل المشاكل المتزايدة في الصعد الهندسية المختلفة .

الفصل العاشر

نظرية المعلومات والفيزياء

قدمت في الفصل الثاني لمحة تلويحية من نظرية الاتصالات ، وأوضحت حينئذ ان هذه النظرية وليدة الاتصالات الكهربائية ، وكما نعلم فإن دراسة التيارات الكهربائية والمجالات الكهرطيسية تقع في القلب من الفيزياء الحديثة .

لم تكن الكهرباء لتقدم كوسيلة للاتصالات بالنسبة لمورس ومعاصريه الا امكانيات محدودة بالمقارنة مع الصوت الانساني او الكتابة . لقد كان على هؤلاء الباحثين ان يصمموا طرقا للترميز يمكن بواسطتها تمثيل الاحرف الأبجدية بسلسلة من نبضات القطع والوصل الكهربائية . وقد قادت مسألة ترميز الرسائل بشكلها العام الى الافكار المحدثة حول موضوع الترميز . وطالما ان القضية برمتها تنحصر في البحث عن وسيلة للترميز باستخدام التيار الكهربائي ، فها نحن الآن امام علاقة نوعية بين الترميز وظاهرة فيزيائية محددة . اننا امام رابطة تظم نظرية الاتصالات والفيزياء .

وقد رأينا ايضا أن الاشارات التي نرسلها عبر الاسلاك او بواسطة الراديو ستصل ممزوجة ببعض التشويشات التي اطلقنا عليها اسم الضجيج . وهذا امر يمكن تحاشيه الى حد ما ، اذ يمكن تخفيض الضجيج الذي يصل الى اجهزة الاستقبال بتبني تصميم مناسب وابتكار اختراعات جديدة . ففي حالة استقبال اشارات الراديو نستخدم

هوائيا يتلقى الاشارات بشكل فعال من اتجاه ارسال المصدر ويكون اقل حساسية للاشارات القادمة من اتجاهات اخرى ، كما نستطيع التاكيد من ان جهاز الاستقبال لدينا يتجlob مع التواترات التي نرغب باستخدامها ولا يابه للاشارات المتداخلة ولا للضجيج من تواترات اخرى .

وعلى الرغم من كل هذه الاجراءات ، فسيبقى هناك حد ادنى من الضجيج ممزوج مع الاشارة التي نستقبلها ، وقد يتأتى بعض هذا الضجيج من اجهزة اقلاع السيارات او مصادر طبيعية كالبرق والصواعق وحتى في حالة غياب البرق والصواعق فسيستمر الضجيج طالما بقيت حرارة في الكون . لاحظ براون ، وهو بيولوجي بريطاني ، منذ سنين عديدة ، كيف ان حبات غبار الطلع المعلقة في سائل ما تتحرك بشكل عشوائي عندما ننظر اليه في المجهر ، فبعضها يتحرك جيئة والآخر ذهابا وبعضها يتسارع ، وعلى العكس يتباطأ البعض الآخر ، دمي هذا الطراز من الحركة بالحركة البروانية ، وتنتج هذه الحركة بشكل اساسي من ارتباط اللرات والجزيئات ببعضها . . كان الانجيز العلمي المبكر لاينشتاين هو ابتداء نموذج رياضي للحركة البروانية .

كان من الممكن لحبات غبار الطلع التي شاهدها بروان ان تبقى ساكنة لو كانت الجزيئات المحيطة بها ساكنة ، الا ان جزيئات السائل نفسها في حركة دائمة ، وهذه الحركة بعد ذاتها هي التي تتمخض من ظاهرة الحرارة . تتحرك جزيئات الفلزات بشكل غير منتظم وبسرعة او ببطء اثناء الفترات الزمنية الفاصلة بين اصطداماتها مع جزيئات اخرى ، اما في السوائل فتحتشد الجزيئات وتندافع عن قرب مغيرة امكنتها بشكل مستمر وبسرعة او ببطء ايضا . يختلف الامر في الاجسام الصلبة حيث تهتز اللرات وتراوح حول مواقع سكونها النسبية ، ترة بصمات عالية واخرى بصمات منخفضة الا انها لا تفارق مواقعها بالنسبة للجوار اطلاقا وهكذا تتحرك الجزيئات على الدوام سواء في الفلزات او في السوائل او في الجوامد ، وتتناسب حركاتها مع وسطي طاقاتها التي تتوقف بدورها على درجة حرارة تلك الاجسام بالنسبة للصفر المطلق (- ٢٧٣ درجة

مثوية تقريبا) ، وتختلف اتجاهات وسعات تلك الحركات باختلاف الطاقة والسرعة من جزئي لجزئي .

لا تقتصر الطاقة في كوننا على الطاقة الميكانيكية فقط ، اذ تمتلك الامواج الكهرطيسية طاقة ايضا ، وتولد هذه الامواج من التيارات الكهربائية المتغيرة . تتكون اللرات من نوى موجبة تدور حولها الالكترونات سالبة ، بينما تتركب الجزيئات من ذرات . عندما تهتز جزيئات مادة ما بسبب الطاقة الحرارية ، تولد الحركات النسبية لمكونات تلك الجزيئات امواجاً كهرطيسية ، وتنطوي تلك الامواج على توارثات من بينها ما ندهوه بتوارثات امواج الراديو ومنها الحرارة والضوء . يقال ان الجسم الحار يشع امواجاً كهرطيسية ، وتسمى تلك الامواج اشعاعاً .

ان معدل ما يصدره الجسم ، المحفوظ في درجة حرارة معينة ، من طاقة محمولة على امواج راديوية او حرارية او ضوئية تختلف باختلاف مادة الجسم فالاجسام القاتمة تصدر من الاشعاع كمية اكبر مما تصدره الاجسام اللامعة . وهكذا فالفضة ، المعروفة بلمعاتها لانها تعكس امواج الراديو والحرارة والضوء الساقطة عليها ، هي في واقع الامر مادة قليلة الاشعاع ، في حين ان هباء الفحم للحجر الاسود أكثر اشعاعاً من الفضة . عندما يسقط الاشعاع على مادة ما ، فان الاشعاع المنعكس ، لا الاشعاع الممتص عموماً ، يختلف باختلاف تواتر الاشعاع الوارد ، من امواج الراديو الى الامواج الضوئية مثلاً . الا ان هناك قاعدة عامة تحكم كمية الاشعاع من تواتر معين ، فكمية الاشعاع الصادرة عن مادة ما في درجة حرارة معينة تتناسب مع النسبة من الاشعاع التي يمتصها الجسم عند سقوط هذا الاشعاع عليه . وهكذا فكانما هناك طبقة اشبه بالجلد حول كل مادة تسمح لكمية من الاشعاع الساقط بالعبور وتعكس الباقي ، ويبدو ان نسبة الاشعة التي تعبر تلك الطبقة الجلدية هي نفسها سواء كلفت الاشعة واردة على المادة او خارجة منها ولو لم يكن الامر كذلك لاستطعنا ان نتوقع ظاهرة غريبة وغير طبيعية (تناقض ما نعرفه عن قوانين الطبيعة) . لتتخيل علة محكمة الافلاق

أو فرناً في درجة حرارة للجنة ، وأننا كنا قد خلقنا جسمين داخل هذا الفرن ، ولنفرض (خلافاً للواقع) أن أحد هذين الجسمين عاكس جيد للأشعاع وماص رديء له وأنه في الوقت نفسه مصدر جيد للأشعاع ، أما الجسم الثاني فنفترض أنه ماص جيد للأشعاع وعاكس رديء له وأنه أخيراً مصدر سيء للأشعاع . فنتصور أن الجسمين كانا في لحظة معينة في درجة حرارة واحدة . أن الجسم الأول سيمتص من الأشعاع أقل مما يصدر وذلك بعكس ما يفعل الجسم الثاني الذي يمتص أكثر مما يصدر . فلو جرت الأمور على هذا النحو فإن الجسم الثاني سيسخن أكثر من الجسم الأول . ليس هذا هو واقع الأمور ، فكل الأجسام الحبيسة داخل غلب أو أفران مغلقة ذات درجات حرارة واحدة ومنظمة إذ أنها لا بد ستصل إلى درجات حرارة مساوية لدرجة حرارة الغلبة أو الفرن ، سواء أكانت تلك الأجسام لامعة عاكسة جيدة للأشعاع وماصة رديئة له ، أو قائمة عاكسة رديئة وماصة جيدة . ولهذا لا يمكن أن يحدث إلا إذا كانت قابلية امتصاص الأشعاع لا قابلية عكسه مساوية تماماً لقابلية إصداره كما هو واقع الحال في الطبيعة .

إن الأمر في الفرن الموحد لا يقتصر على بلوغ الأجسام الحبيسة درجة حرارة واحدة ، بل إن هناك شدة أشعاع تتميز بها مثل هذه الأوعية الموصدة . لتتخيل أن ومضة من الأشعاع السائد في هذا الموحد يسقط على أحد جدرانها . أن جزءاً منها سينعكس ليصبح مجرد أشعاع في أجواء الموحد ، بينما سيمتص الجدار الآخر . سيطلق الجدار بدوره كمية معينة من الأشعاع ينضم إلى ما هو موجود في جو الموحد . وهكذا فهناك تبادل دائم للأشعاع بين جو الموحد وجدرانها .

إذا كان الأشعاع في الداخل ضعيفاً جداً ، فإن الأشعاع الصادر من الجدران سيكون أكبر مما يرد عليها ومما تمتصه . أما إذا كان أشعاع الجو كبيراً فإن الجدران ستلتقي وتمتص من الأشعاع أكثر مما تصدر إذا تسلوى الأشعاع الساقط على الجدران مع الأشعاع الصادر عنها ، قبل من الأشعاع بأنه في حالة توازن مع المادة المحيطة به . أن لهذا

الاشعاع طاقة تزيد بزيادة درجة الحرارة ، تماماً كما تزداد الطاقة الحركية لجزيئات الغاز أو السائل أو الجامد بزيادة سخونتها .

لا تتوقف شدة الاشعاع في الموصل على قلبية جدرانه لعكس الاشعاع أو لامتناعه ، بل تتوقف على درجة حرارة تلك الجدران فقط . اذ لو لم يكن الأمر كذلك ، وعمدنا الى صنع أنبوب قصير يصل بين جوف موصل لامع ذي جدران عاكسة ، وبين جوف موصل آخر قاتم وذي جدران ماصة ، وكان الموصلان في درجة حرارة واحدة ، لحصلنا على تدفق اشعاعي من أحد الموصدين الى الآخر عبر الأنبوب الا أن مثل هذا الأمر لا يحصل أبداً في الواقع .

نستنتج أن هناك شدة أصغر معينة للاشعاع الكهرطيسي ، كالضوء والحرارة وأمواج الراديو ، مقابلة لدرجة حرارة معينة . إن الأمواج الكهرطيسية تنتشر في الفراغ والهواء والمواد العازلة كالزجاج ، كما يمكن نقلها بالأسلاك . نستطيع في الواقع النظر الى اشارة مرسله عبر زوج من أسلاك الهاتف من منظورين مختلفين فالاشارة في الآلية الأولى تتألف من تيار الالكترونات يحركها فرق الكمون ، أما في المنظور الثاني فتتكون الاشارة من حقلين ، كهربائي ومغناطيسي ، بين السلكين وحولهما يتحركان مع التيار . وكما أن بإمكاننا اعتبار الاشارات الكهربائية في الأسلاك أمواجاً كهرطيسية وبما أن الأجسام العازلة تشع أمواجاً كهرطيسية ، فعلينا أن نتوقع بالمقابل امكان أن تولد الحرارة إشارات كهربائية . وقد استطاع ج. ب. جونسون ، مكتشفه التقلبات الكهربائية المنسببة عن الحرارة ، توصيف تلك التقلبات لا بدلالة الأمواج الكهرطيسية ، بل بدلالة تقلبات فرق الكمون بين طرفي مقاومة معينة .

واستطاع فيزيائي آخر ، إثر انتهاء جونسون من قياس تلك التقلبات ، استنبط الصيغة النظرية لها بتطبيق قواعد الميكانيك الاحصائي . لم يكن هذا الفيزيائي الا هـ. نيكويست ، الذي ، وكما رأينا في الفصل الثاني ، قدم مساهمة كبيرة في إرساء قواعد نظرية المعلومات .

أما صيغة نيكويسست والتي تسمى اليوم ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري ، فتعطي على النحو التالي :

$$k = 4 \text{ د م س}^2$$

حيث k وسطى مربع كيون الضجيج ، أي القيمة الوسطية لمربع كيون الضجيج عبر المقاومة المتبعة . θ هو ثابت بولتزمان :

$\theta = 1.37 \times 10^{-23}$ جول / لكل درجة حرارة د درجة حرارة المقاومة مقاسة بالنسبة للصفر المطلق ، ولدى درجة حرارة كالفن وتسوي درجة الحرارة الثوية مضافا إليها 273 . m هي قيمة المقاومة مقاسة بالأوم . وأخيرا s هو عرض حزمة التواترات للضجيج مقاسا بالهرتز في الثانية (ه ف ث) .

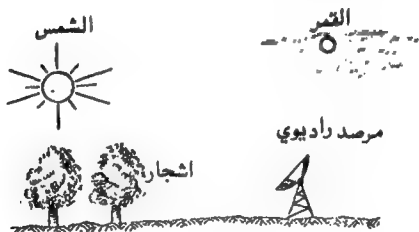
يعتمد عرض الحزمة s بالطبع على خصائص أجهزة القياس لدينا . فلو ضخمنا الضجيج باستخدام مضخم عرض الحزمة لحصلنا على ضجيج أكثر مما لو استخدمنا مضخما ضيق الحزمة وبفقد المردود . وهكذا نتوقع ضجيجا أكثر في التلفزيون لأنه يضخم الاشارات عبر حزمة يبلغ عرضها عدة ملايين من الهرتز في الثانية ، بينما يكون الضجيج اقل في الراديو لأنه يستخدم لتضخيم الاشارات حزمة ذات عرض يسوي عدة آلاف من الهرتز في الثانية .

رأينا أن المقاومة الحارة تنتج ضجيج كيون فلو ربطنا بالمقاومة الحارة مقاومة أخرى لتدفقت الطاقة الكهربائية الى هذه المقاومة ، وإذا كانت هذه المقاومة الأخيرة باردة ، فستقوم الطاقة بتسخينها . وهكذا فالمقاومة الحارة هي مصدر كيووني لضجيج طاقة . ما هي القيمة العظمى لاستطاعة الضجيج التي يمكن أن تغذيها ؟ تعطي تلك القيمة بالملاقة :

$$P = \theta \text{ د س}^2$$

تعتبر هذه العلاقة ، على نحو ما ، أجود من سلفتها . إن لم يكن
لسبب فلأنها تحوي عدداً أقل من الحدود ، ولم تعد قيمة المقاومة م
ظاهرة فيها . كما أن صيغتها تتيح تطبيقها في حالات أخرى .

نفرض مثلاً أن لدينا مرصداً راديوياً ، وهو عاكس مكافئ كبير
يقوم بتركيز أمواج الراديو على مستقبل عالي الحساسية . أوضحت
مثل هذا المرصد في الشكل ١٠ - ١ . نفرض أننا نستخدم هذا المرصد إلى
أجسام سماوية أو أجسام أرضية مختلفة ، بهدف تلقي الضجيج الصادر
عنها بسبب سخونتها .



الشكل ١٠ - ١

نحسب طانة الضجيج الراديوي المستقبل باستخدام العلاقة الأخيرة
حيث د هي درجة حرارة الجسم الذي نوجه نحوه المرصد الراديوي .

إذا وجهنا المرصد الراديوي جهة تجمع مائي أو أرض ملساء ، فما
سيشاهده المرصد في هذه الحالة هو انعكاس السماء ، أما إذا وجهناه
نحو أجسام لا تمكس الأمواج الراديوية بشكل جيد ، كالأشجار والأشجار
المورقة ، نحصل على ضجيج مقابل لدرجة حرارة ٢٩٠. كالفن أي حوالي
١٧ درجة مئوية ، وهي درجة حرارة الأشجار .

ولو وجهنا المرصد نحو القمر ، وكان المرصد محكم التسديد بحيث لا يرى إلا القمر دون جواره ، لحصلنا على نفس الضجيج تقريباً وهو ليس ضجيج سطح القمر بل ضجيج ما تحت سطح القمر بعمق حوالي السنتيمتر ، ذلك لأن ملادة القمر شغافة للأمواج الراديوية نوعاً ما . نذكر هنا بأن الضجيج نلجم عن درجة الحرارة .

أما إذا سددنا المرصد نحو الشمس ، تتوقف إذ ذاك كمية الضجيج على التواتر الذي نضبط المرصد لاستقباله . فإذا كان ذلك التواتر حوالي ١٠ مليون هـ فـ ث (يقابل طول موجة ٣٠ متر نحصل) على ضجيج يقابل درجة حرارة مساوية لليون كالفن وهي درجة حرارة الهالة الرقيقة المحيطة بالشمس ، وهذه الهالة شغافة للأمواج الراديوية القصيرة ، كالفلاف الجوي الأرضي تماماً . وهكذا إذا ضبطنا المرصد على تواتر مقداره عشرة آلاف مليون هـ في الثانية نحصل على إشعاع يقابل درجة حرارة ٨٠٠٠ كالفن ، وهي درجة الحرارة السائدة فوق سطح الشمس بقليل . أما سبب ارتفاع درجة حرارة هالة الشمس بالنسبة لما تحتها ، فهو غير معروف تماماً .

يختلف الضجيج الراديوي السنموي باختلاف التواترات ، وعندما يصل التواتر للمعتبر إلى عدة الآلاف ملايين الهزات في الثانية يقابل الضجيج عندئذ درجة حرارة ٣٥٠ كالفن أي حوالي ٢٦٦٩٥ مئوية . أما عند التواترات الأدنى فالضجيج أكبر ويزداد باطراد كلما انخفض التواتر . ثبت المجرات البعيدة على مختلف أصنافها ضجيجاً راديويًا . يحمل الإشعاع الكوني الخلفي ذو درجة الحرارة ٣٥٠ كالفن المذكورة ، تاريخ الكون بين طياته ، أما الأمواج الأخرى فلها تواترات متباينة وتأتي من أمكنة مختلفة .

ومهما يكن من أمر فعلىنا تقبل ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري كحد أدنى لا سبيل لتخلص منه ، أما ما تقطه مصادر الضجيج الأخرى فهي أنها تزيد الأمر سوءاً . إن الطبيعة الأساسية لضجيج جونسون جعلت منه معياراً في قياس حسن أداء أجهزة الاستقبال الراديوية .

يضيف جهاز الراديو ، كما رأينا ، ضجيجاً معيناً الى الإشارة التي يتلقاها ، وهو يضخم ايضاً أي ضجيج يصله نطرح الآن السؤال التالي : كم ضعفاً من ضجيج جونسون بدرجة حرارة مكافئة د ن نعتبرها مقياساً لضجيج جهاز الراديو ، وكلما كانت اصغر كان جهاز الراديو اجود .

نلقي فيما يلي بعض الضوء على درجة حرارة الضجيج د ن ، نتصور جهاز راديو مثالياً بدون ضجيج وله نفس المردود وحرص الحزمة كجهاز راديو فعلي ، ثم نرسل في هذا الجهاز المثالي ضجيج جونسون المقابل لدرجة الحرارة د ن بالإضافة الى الإشارة المستقبلية فيه . يترتب على ذلك ان نسبة طاقة الإشارة الى طاقة الضجيج في هذا الجهاز المثالي ، المضاف اليه ضجيج جونسون ، هي نفسها لجهاز الراديو الفعلي .

اذن فلدرجة حرارة الضجيج د ن هي مقياس جيد لضجيج جهاز الراديو . يستخدم في بعض الأحيان مقياس آخر يعتمد على د ن ويعطى رقم الضجيج ، ويعطى بالعلاقة :

$$R \text{ د ن} = \frac{293 + \text{د ن}}{293} + 1$$

حيث R د ن هو رقم الضجيج المعروف .

إن تعريف رقم الضجيج هذا هو تعريف ارضي الطابع حيث تمتزج كل إشارة مع ضجيج مقابل لدرجة حرارة 293 كالفن تقريباً . يساوي رقم الضجيج نسبة الخرج الكلي للضجيج ، بما في ذلك ضجيج جونسون المقابل لدرجة حرارة 293 كالفن عند الدخل والضجيج المنتج من قبل الراديو ، الى ضجيج جونسون المضخم وحده .

تعتمد درجة حرارة الضجيج D لجهاز راديو على طبيعة وجودة ذلك الجهاز ، أما الحد الأصغري لرقم الضجيج فيعتمد على التواتر المستعمل . يبين الجدول التالي درجات حرارة الضجيج لبعض أنواع أجهزة الاستقبال .

نوع جهاز الاستقبال درجة حرارة الضجيج - كالفن

راديو أو تلفزيون جيد	١٥٠٠
محطة استقبال ميزر لرحلات الفضاء	٢٠
جهاز استقبال مضخم	٥٠

ان درجات الحرارة الفعلية لأجهزة الاستقبال الراديوية وكذلك درجات حرارة الأجسام التي نوجه نحوها هوائيات أجهزة الراديو تلك ، هي من الأهمية بمكان في نظرية الاتصالات ، لان الضجيج يحدد الطاقة اللازمة للإرسال . ان ضجيج جونسون هو من النوع الفأوسي الذي تنطبق عليه علاقة سبق ان عرضناها : وهي :

$$S = S_{\text{لع}} \left(1 + \frac{Q}{D} \right)$$

أي لإرسال S بيت في كل ثانية يجب ان نوفر للإشارة استطاعة Q ترتبط مع استطاعة الضجيج D بهذه العلاقة . فإذا اعتمدنا الضجيج D من العلاقة الثانية في هذا الفصل : $D = \theta S$ نحصل على :

$$S = S_{\text{لع}} \left(1 + \frac{Q}{\theta S} \right)$$

نفرض استطاعة للإشارة Q معطاة . اذا صغرنا S تصغر S بالمقابل ، أما اذا كبرنا S ، فإن S لن تكبر الى ما لا نهاية ، بل ستكبر

مقترية على الدوام من حد معين . وعندما يصبح الكسر $\frac{ق}{ث د س}$ صغيراً جداً بالمقارنة مع الواحد نحصل على :

$$\frac{١٠٤٤ ق}{ث د} = ص$$

أي أن $ق = ٦٩٣ ر. ث د ص$

تؤكد هذه العلاقة الأخيرة أنه حتى لو استخدمنا حزمة مريضة جداً فإننا سنحتاج على الأقل لطاقة قيمتها ٦٩٣ ر. ث د جول في كل ثانية لإرسال بيت في كل ثانية ، أي أننا يجب أن نستخدم بشكل وسطي طاقة مساوية ٦٩٣ ر. ث د جول لكل بيت من المعلومات نود إرسالها . يجب أن نتذكر أن استنتاجنا لهذه العلاقة انطلق من فرض مثالي مفاده أن علينا اعتماد طريقة للترميز تضم عدداً كبيراً من الأحرف الممثلة لكم معلوماتي غزير ثم ترمزها وفق إشارة مديدة . نحتاج معظم أنظمة الاتصالات الفعلية كمية أكبر من الطاقة لكل بيت من المعلومات ، كما لاحظنا في الفصل التاسع .

ولكن ألم ننس شيئاً ما ؟ ماذا عن الآثار الكوانتية . ربما أنها ليست ذات أهمية في الراديو ، ولكنها مهمة بشكل مؤكد في الاتصالات الضوئية ، وقد انفتحت أمام الضوء مجالات تطبيقية واسعة . تنقل الألياف البصرية الدقيقة الأصوات ومختلف الحمولات الأخرى كما تتيح ومضات الضوء المنعكسة عن المرايا القمرية متابعة تغيرات بعد القمر عن الأرض بخطاً مقداره ١ سنتيمترات ، وكان رواد الفضاء قد تركوا تلك المرايا على سطح القمر في رحلاتهم القمرية المتتالية .

كان هاري نيكويست رجلاً مستقبلياً . لقد صاغ ضجيج جونسون لمرض حزام قلده س وفق العلاقة :

$$\frac{b \times \lambda \times s}{\frac{b \times \lambda}{\lambda - e}} = n$$

ومن ميزات هذه العلاقة إمكانية تطبيقها على كل التواترات بما في ذلك الضوء . أما الكميات الواردة فيها فهي :

ن : طاقة الضجيج . ت : التواتر مقدر بـ هـ ف ث

ب : ثابت بلانك ويساوي 6.63×10^{-34} جول . ثانية

نربط عادة بين ثابت بلانك مع طاقة فوتون ووحد للضوء بالعلاقة :

$$\text{طاقة الفوتون} = b \times \lambda$$

ث : ثابت بولتزمان . د : درجة الحرارة مقدرة بمقياس كالفن .

س : عرض حزمة التواترات .

تصبح الاثار الكوانتية ذات أهمية عندما يصبح الجداء ب \times ث مساوياً أو أكبر للجداء ث \times د . وهكذا فالقيمة الحدية للتواتر التي تصبح علاقة نيكويست الأخيرة غير صالحة لقيم التواتر الأكبر منها هي :

$$t = \frac{b \times \lambda}{d} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1.0 \times 10^{-10}} = 6.63 \times 10^{-24} \text{ ث}$$

عندما نأخذ الاثار الكوانتية بعين الاعتبار ، لا نجد ضجيجاً أكثر في التواترات العالية ، بينما نجد ضجيجاً قليلاً جداً عند التواترات الضوئية . إلا أن هناك قيوداً كوانتية غير تلك التي يفرضها الضجيج جونسون . ولكن يبقى المقدار ٦٦٣ ر. ث د جول لكل بيت هو الحد العملي حتى في مجال

الضوء المرئي ويتمدد الوصول عمليا الى ذلك الحد في الاحوال الفعلية .
 هناك طريقة شائعة وغير صحيحة للاتصال ، وهي في واقع الامر اسوأ ،
 وتتلخص بتضخيم الإشارة ضعيفة مستقبلية باستخدام مضخم جيد .
 إن هذا ممكن من الناحية النظرية ، ولكنه سيء للغاية بقرى ١٥ .

عندما تضخم نبضة ضعيفة عند تواترات منخفضة نحصل ببساطة على
 على نبضة ذات استطاعة أكبر نستطيع قياس زمن صعودها الى ذروتها
 وطيف تواترها نمتزح علاقة هايزنبرغ للريبة في الميكانيك الكوانتي ، إذ
 وفق هذه العلاقة لا نستطيع قياس الزمن والتواتر معا وبدقة لا متناهية .
 إذا رمزنا للخطأ في قياس الوقت بالرمز Δt ، وللخطأ في قياس التواتر
 بالرمز $\Delta \omega$ ، فإن أحسن ما يمكننا فعله متضمن في العلاقتين :

$$\Delta \omega \times \Delta t = 1$$

$$\frac{1}{\Delta t} = \Delta \omega$$

تنطوي هذه العلاقة على حقيقة مفادها أننا إذا اقتربنا من تواتر النبضة
 بدقة بالغة من طريق تصغير Δt ، فإننا بالمقابل لن نستطيع تحديد
 لحظة وصول النبضة بدقة كافية . ويتكلمات أوضح : لا نستطيع تحديد
 لحظة وصول نبضة طويلة ذات حزمة تواترات ضيقة بدقة كافية كما نفعل
 في حالة نبضة قصيرة ذات عرض كبير . ولكن كم نحن عاجزون من محاولة
 إجراء مثل هذا القياس ؟

لتفرض أننا نضخم نبضة ضعيفة باستخدام أجود مضخم ممكن وأنها
 نوزح كل تواتراتها حتى مجال أدنى تضعف عنده الأثر الكوانتية . نجد
 عند ذلك استطاعة الضخيج ن مزوجة مع الإشارة المضخمة :

$$N = C B T S$$

حيث :

ت : هو تواتر الإشارة الأصلية العالية التواتر .

ج : هو الكسب الطاقى لنظام التضخيم والإزاحة .

س : عرض الحزمة يؤكد هذا الضجيج ، وفق قيمته الحاسوبية
هذه ، أننا لن نستطيع إجراء القياسات بدقة أكبر من تلك التي تسمح لنا
بها علاقة هايزنبرغ للريبة .

يجب أن نزيد عرض الحزمة س بهدف زيادة دقة قياس الوقت ،
إلا أن الضجيج الإضافي الذي يترتب على زيادة عرض الحزمة والمعطى
بالعلاقة الأخيرة سينقص من دقة قياس الوقت التي وفرتها زيارة
عرض الحزمة .

نستطيع باستخدام العلاقة الأخيرة واسلوب مناقشة قدمناه للتو،
أن نصل الى استنتاج مفاده ان علينا استخدام طاقة لا تقل عن
١٩٣. ب ت جول لكل بيت في ظل الأثار الكوانتية كي نستطيع تحقيق
الاتصال بإشارة تواترها ت . تصلح هذه المناقشات لانظمة الاتصالات
التي نضخم فيها الإشارة المستقبلية باستخدام أجود المضخمات ، أي تلك
المضخمات التي تضيف من الضجيج ما يكفي لإبعادنا عن تجاوز علاقة
هايزنبرغ للريبة .

هل هناك بديل عن تضخيم الإشارة الضعيفة المستقبلية ؟

الإجابة نعم في حالة التواترات الضوئية . يمكن استخدام فوتونات
الضوء لإنتاج نبضات كهربائية ضعيفة . تنتج بعض الأجهزة نبضات
كهربائية قصيرة عندما تصلها فوتونات الضوء ، على الرغم من أنها قد
تفشل أحيانا بالاستجابة لبعض الفوتونات بشكل عشوائي ، من هذه
الأجهزة الخلايا الكهروضوئية . ان المردود الكوانتي العملي لهذه الأجهزة
أقل من ١٠٠ ٪ .

نستطيع من وجهة نظرية ، على الرغم من ذلك ، تحديد لحظة وصول
فوتون ضوئي بتوجيه ذلك الفوتون لإنتاج نبضة كهربائية قصيرة . الا يمكن
أن يخالف هذا مبدأ الريبة . كلا ، لأن قياسنا للحظة وصول الفوتون
بهذه الطريقة سيحول دون معرفة بأي قدر مهما كان صغيراً لتواتر ذلك
الفوتون .

تستخدمعدادات الفوتونات لتحديد لحظات وصول الومضات الضوئية المنعكسة من المرايا التي تركها رواد الفضاء على سطح القمر ، كما تستعمل أيضاً في الاتصال بارسال الامواج الضوئية عبر الالياف البصرية . الا ان استخدامها لا يطبق الحالة النظرية الممكنة ، فهناك حد دون ذلك الاستخدام هو ٦٩٣ر٠ ث د جول لكل بيت ، وهو حد سبق واعترفنا . لا تغير الآثار الكوانتية هذا الاداء الحدي ، ولكنها تجعل من امكانية تحقيقه امراً مستحيلاً . ما هو السبب ؟

ان طاقة الفوتون هي : ب ت ، اما الطاقة النظرية لكل بيت فهي ٦٩٣ر٠ ث د ، وهكذا يمكننا ان نحسب كم بيت لكل فوتون من حاصل القسمة :

$$\frac{\text{ب ت}}{\text{٦٩٣ر٠ ث د}} \quad \text{اي :}$$

$$144 \times \left(\frac{\text{ب ت}}{\text{٦٩٣ر٠ ث د}} \right) \quad \text{بيت لكل فوتون}$$

كيف نستطيع ارسال طاقة مساوية لعدد من واحداث البيت بقياس لحظات وصول عدد قليل من الفوتونات أو لحظة وصول فوتون واحد . نفعل ذلك على النحو التالي : نبث من المصدر نبضة ضوئية خلال برهة من فترة زمنية طولها د مقسمة الى برهات عددها ل ، وعند المستقبل يلعب المجال الزمني الذي تنطلق الفوتون اثناءه دور موصل الرسالة .

سيسمع هذا في احسن الاحوال من نقل ما مقداره لع ل بيت من المعلومات لكل فترة زمنية د. الا اننا لن نطقى اي فوتونات عند بعض اللحظات الزمنية ، بينما ستصل عند لحظات أخرى خاطئة فوتونات حرارية اي فوتونات ضجيج جونسون . ان هذا هو ما يجعل الارسال في

$$\text{حدود } 144 \times \left(\frac{\text{ب ت}}{\text{٦٩٣ر٠ ث د}} \right) \quad \text{بيت لكل فوتون .}$$

نستطيع في الواقع العملي ارسال عدد اقل من وحدات البيت لكل فوتون لانه من غير العملي ان نسمى الى أنظمة فعالة بإمكانها ارسال عدد كبير من وحدات البيت لكل فوتون .

توصلنا بتوحيد نظرية المعلومات والفيزياء الى قيمة الطاقة الدنيا اللازمة لنقل بيت واحدة من المعلومات ، وهي : ٦٩٣ ر. ث د جول .

ان الضجيج الموجود بشكل فعلي في اجهزة الراديو المعاصرة اكبر من الضجيج المحيط لان المضمخ يضيف ضجيجاً مقابلاً لدرجة حرارة أعلى من درجة حرارة المحيط . دعونا نستخدم درجة حرارة الضجيج θ بدلا من درجة حرارة الضجيج المثلة للضجيج المضاف فعلا الى الإشارة كيف يمكننا ان نقارن الاداء الفعلي مع العلاقة النظرية :

$$ص = س ل (1 + \frac{\theta}{ق})$$

اذا لم تلجأ الى تصحيح الاخطاء واكتفينا باستخدام قدر من طاقة الإشارة يكفي لتصبح الاخطاء في المعلومات المستقبلية قليلة الحدوث (بحدود خطأ واحد لكل ١٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ بيت مستقبلية) فان علينا استخدام طاقة لكل بيت تساوى عشرة اضعاف ما تتطلبه العلاقة النظرية المذكورة .

ان اكثر أنظمة الاتصالات تعقيدا هي تلك التي تستخدم لارسال المعلومات من المركبات المرتبطة في اعماق الفضاء . وهي عبارة عن اجهزة ميزر مستقبلية ذات ضجيج منخفض تتضمن الترميز وحال الترميز الالتفافي وفق مخطط فيتربي . استطاعت مركبة فويجر ارسال صور المشتري وتوابعه الى الارض بيت ١١٥٢٠٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية بنسبة خطأ ٥ ر. % واستخدام استطاعة قدرها ٢١٣ واط ولا تزيد استطاعة الصوت الا بمقدار ٤ ر. ديسبل من الحد المثالي للمناجم عن عرض توانري لا متناه في الكبر .

يبعد بلوتو حوالي 6×10^{12} متر من الأرض . ما هي سرعة الإرسال التي تستطيع مركبات الفضاء المرحلة إليه تحقيقها . نفرض أن المصدر الوحيد للضجيج هو الفضاء الكوني ، ونهمل امتصاص الغلاف الجوي .

إذا استخدمنا هوائي إرسال مساحته الفعالة C_r وهوائي استقبال مساحته الفعالة C_s ، تصبح نسبة الاستطاعة المستقبلية إلى الاستطاعة المرسله وفق علاقة فرييس للإرسال مساوية :

$$\frac{C_r \times C_s}{4 \pi R^2} = \frac{P_r}{P_t}$$

حيث R هو طول الموجة المستخدمة في الاتصال و C هو البعد بين

المرسل والمستقبل ويساوي في حالتنا 6×10^8 متر .

نتقي بشكل اختياري مرسلًا استطاعته ١٠ واط . سنعتبر هنا حالتين . نستخدم في الحالة الأولى موجة طولها ١ سنتيمتر أو ٠.٠١ متر . يقابل طول الموجة هنا درجة حرارة للفضاء ، مساوية إلى ٣٥٠ كلفن . نفرض أن مساحة هوائي الإرسال ١٠ متر مربع وهو على شكل مربع ضلعه ٣.١٦ متر ، بينما هوائي الاستقبال هو مربع آخر ضلعه ٣.١٦ متر ومساحته ١٠٠٠ متر مربع . تبين العلاقة الأخيرة أنه إذا كانت الاستطاعة

١٧ -

المرسله المستقبلية 10^{-10} واط . إذا اعتبرنا الطاقة لكل بيت ١٦٩٣. ث د حيث $D = 35$ كالفن ، نستنتج أن أجهزة الإرسال على المركبة الفضائية تستطيع إرسال ٨٠٠٠٠ بيت في كل ثانية ، وهي كمية ممتازة من المعلومات .

وماذا من نظام الاتصال الضوئي نفرض أن طول الموجة 6×10^{-7} متر وهو يقابل تواتراً قدره 5×10^{14} هـ ف ث ، وهذا هو الضوء المرئي . نفرض هوائيات أصفر (عدسات أو مرآيات) ، مثلاً الهوائي المرسل مربع ضلعه ١ متر ومساحته ١ متر مربع ، والهوائي المستقبل مربع آخر ضلعه ١٠ متر ومساحته ١٠٠ متر مربع . ونفرض هنا مرة أخرى أن استطاعة الإرسال هي ١٠ واط . أن درجة الحرارة الضوئية للفضاء ، أي مجموع ضوء كل النجوم ، هي كمية غير معروفة تماماً وسنفرضها هنا ٣٥٠ كالفن . نحسب سعة إرسال مقدارها ٨٠٠ مليون ألف بيت لقناتنا الضوئية .

إذا تلقينا ٨٠٠ ألف مليون بيت في كل ثانية ، فيجب أن نتلقى ١٠٠ بيت لكل فوتون . يبدو من غير المحتمل تحقيق ذلك . ولكن حتى لو تلقينا بيت واحد لكل فوتون فسنستطيع استقبال ثمانية آلاف مليون بيت في كل ثانية . يبدو الاتصال الضوئي أفضل طرق الاتصال عبر المسافات البعيدة في الفضاء .

أن أهم جوانب العلاقة بين نظرية المعلومات والفيزياء ، من منظور نظرية المعلومات ، هي التقييم الدقيق للقيود التي لا يمكن التخلص منها والتي تفرضها قوانين الفيزياء على عمليات الاتصال . تتركز القيود ، بشكل رئيسي في ضجيج جونسون والآثار الكوانتية . إلا أن هناك قيوداً أخرى كاضطرابات الغلاف الجوي التي تشوه الإشارة بشكل مثير لهما تفعله إضافة الضجيج إليها . يمكن التغلب على هذه أمثلة أخرى من هذا النوع من العلاقة بين الفيزياء ونظرية المعلومات .

استغرقت الفيزيائيين فكرة ارتباط بين الفيزياء ونظرية الاتصالات مستقلة عن المسألة الأساسية التي أخذت نظرية الاتصالات على عاتقها مهمة حلها أي بإمكانيات تقييد الترميز الفعال لدى بث المعلومات عبر قناة ذات ضجيج .

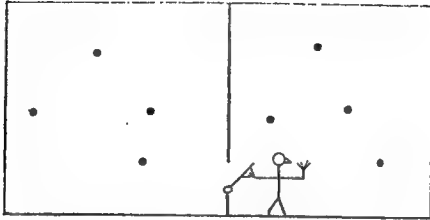
يقترح الفيزيائيون استخدام مفهوم ارسال المعلومات ليبرهنوا استحالة الالة الدائمة الحركة من النوع الثاني . لقد سبقت هذه الفكرة ، في الواقع ، اختراع نظرية الاتصالات في ربحا المعاصر ، فقد قدم زيلارد افكاراً مماثلة عام ١٩٢٩ .

تنتهي بعض الآلات الدائمة الحركة الى خلق الطاقة من لا شيء وهذا الفعل يخالف القانون الاول للترموديناميك ، اي قانون انخفاض الطاقة . أما بعض الآلات الدائمة الحركة الاخرى فتففي الى ترتيب الطاقة الحرارية الموزعة اصلاً في المادة او الاشعاع بشكل فوضوي ضمن فرص ثبات درجة الحرارة ، كما في دوران دولاب الموازنة الذي يمكن استخدامه لادارة محرك قد يقوم بتبريد بعض الاجسام وتسخين بعضها الاخر وهكذا فيمكن هذا النوع من الحركة الدائمة نقل الطاقة من الاجسام الباردة الى الاجسام الساخنة دون استخدام طاقة منظمة اضافية .

ينص القانون الثاني للترموديناميك على استحالة نقل الحرارة من الاجسام الباردة الى الاجسام الساخنة بدون توظيف طاقة منظمة يمكن وضع هذا القانون في صيغة اخرى تقول : يستحيل تناقص الانتروبي الخاصة باي نظام . وهكذا نرى ان الآلات الدائمة الحركة من النوع الثاني تنتهك القانون الثاني للترموديناميك .

اخترع جيمس كلارك ماكسويل اكثر الآلات الدائمة الحركة من النوع الثاني شهرة . تستخدم هذه الالة كائناً وهمياً هو شيطان ماكسويل . يوضح الشكل ١٠ - ٢ هذه الالة .

يقطن هذا الشيطان على مقسومة ويمكنه تحريك باب بين القسمين عندما يشاهد جزيئاً سريعاً يتحرك جهة الباب من القسم الاخر ، يفتح الباب ويدفع هذا الجزيء يدخل ناحيته ، وعندما يشاهد جزيئاً بطيئاً متدفعاً من جهته نحو الباب ، يسمح له بالمرور نحو الجانب الاخر . انه باختصار يمنع الجزيئات البطيئة من دخول قسمه والجزيئات السريعة



الشكل ١٠ - ٢

من مفادته . وهكذا يتحول الغاز في قسمه بعد فترة إلى مجموعة من الجزيئات السريعة ، أي إلى غاز حار ، وعلى العكس يتحول الغاز في القسم الآخر إلى مجموعة من الجزيئات البطيئة أي إلى غاز بارد . ان شيطان ماكسويل يستطيع تحقيق انتقال الحرارة من القسم البارد إلى القسم الحار . يبين الشكل ١٠ - ٢ هذا الشيطان وهو يحرك الباب كما يشاء بإحدى يديه ، بينما يدير آفقه باليد الأخرى للقانون الثاني للترموديناميك .

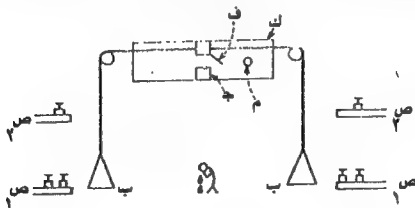
بقي شيطان ماكسويل محيراً لاولئك الفيزيائيين الذين لم يكتفوا بعدم الاكتراث به . نستطيع وضع اعتراض رئيسي ضده ، ينطوي هذا الاعتراض على ان بيئة الشيطان موجودة في حالة توازن حراري ، وأن الضوء الوحيد الموجود هو الاشعاع الكهرومغناطيسي العشوائي المقابل للضجيج الحراري ، وهو ضوء شديد التشويش لدرجة لا يستطيع معها الشيطان استخدامه لتمييز الجزيئات المندفعة نحو الباب .

يمكننا طرح بدائل أخرى لشيطان ماكسويل . ماذا لو وضعنا ، مثلاً ، باباً ذا نابض بين الحجرين بحيث يمكن لجزيء متحرك الارتطام

به وفتحه إذا أتى من إحدى الجهتين ولا يستطيع ذلك إذا أتى من الجهة الأخرى . الا ينتهي الامر إلى تجمع كل الجزيئات بكل طاقتها في الجانب الذي يفتح الباب في جهته .

يمكننا أن نضع الاعتراض التالي على الباب ذي النابض : إذا كان النابض قويا فإن أي جزيء لن يكون بإمكانه فتح الباب ، بينما إذا كان النابض ضعيفا فإن الطاقة الحرارية ستجعل الباب في حالة خفقان دائم وسيبقى مفتوحا في معظم الأوقات . كما أن الجزيئات ستقل الطاقة إلى الباب لدى فتحه . لقد أجمع الفيزيائيون على أن الأجهزة الميكانيكية المماثلة للباب ذي النابض أو الدواليب المسننة الدقيقة لن تستطيع أن تنتهك القانون الثاني للترموديناميك .

إن مناقشة ما هو ممكن وما هو غير ممكن هي مناقشة بالغة الحساسية . لقد استطاع أحد الإصدقاء خداعي بآلة اخترعها ، حتى تنبأت إلى حقيقة أن أرى حيز مغلق في حالة توازن حراري يحتوي على جزيئات عشوائية واشعاع كهرومغناطيسي عشوائي . الا أن هناك آلة واحدة بسيطة وهي على الرغم من كونها عديمة الاحتكاك ، مضحكة ، وغير عملية بالمعنى التطبيقي ، فالأرجح أنها غير مستحيلة فيزيائيا بالمعنى الضيق الذي يستخدم الفيزيائيون به هذه العبارة . يوضح الشكل ١٠ - ٣ هذه الآلة .



الشكل ١٠ - ٣

تستخدم هذه الآلة اسطوانة ك ومكبسنا عديم الاحتكاك ح . عندما يتحرك ح الى اليمين او اليسار يرفع احدى الكفتين ب ويخفض الاخرى يحتوي المكبس ح على فتحة ف يمكن فتحها واغلاقها . تحتوي الاسطوانة على جزئية واحد فقط هو م . تثبت درجة حرارة الآلة عند قيمة معينة د . سيثار الجزية م على قفلان ومكبب الطاقة لدى ارتطامه بجدران الاسطوانة وستكون طاقته الوسطية متناسبة مع درجة الحرارة . اذا حركنا المكبس ببطء الى اليمين او اليسار وكانت الفتحة مغلقة ، لما لزم بذل اي عمل نبدا والفتحة غير مغلقة ، نضبط المكبس في المركز من الآلة ونثبت ثم نفلق الفتحة . ندقق بعد ذلك لمعرفة الجانب من الاسطوانة الذي يتحرك ضمنه الجزية ، ثم نضع وزن مقارنة ص على الكفة التي تقع في نفس جهة الاسطوانة الحاوية على الجزية . نحرر المكبس . ماذا يحصل ؟ ان الارتطام المتكرر للجزية على المكبس سيرفع في النهاية الكفة الحاوية على وزن المقارنة ص نفتح بعد ذلك الفتحة ، ثم نضبط المكبس في المركز من الآلة ونكرر العملية . نتلخص نتيجة عملنا باننا استطعنا رفع عدد كبير من اوزان المقارنة الى الاعلى ، وبكلمة اوضح انجزنا عملا منظما باستخدام طاقة حرارية غير منظمة .

كم هي قيمة العمل الذي بدلناه ؟ يمكننا ان نبرهن على ان القيمة الوسطية للقوة التي يدفع بها الجزية المكبس هي :

$$ق = \frac{ث د}{ل}$$

حيث ل هو البعد بين المكبس وطرف الاسطوانة في الجهة التي يتحرك ضمنها الجزية . عندما نسمح للجزية بدفع المكبس وسوقه ببطء الى نهاية الاسطوانة بحيث تتضاعف المسافة ، فان اكبر قيمة للعمل الذي يبذله الجزية هو : $س = ٦٩٣.٠ ث د$

واقع الامر ان العمل المبذول لرفع وزن ثابت سيكون اقل من ذلك ، فالملاقة الاخيرة تمثل الحد الاعلى ، ولكن هل حصلنا على ذلك بدون مقابل ؟

ليس تماماً ، فعندما ضبطنا المكبس في المركز واغلقتنا الفتحة نجد انفسنا امام احتمالين متساويين يتعلق بوجود الجزي في إحدى جهتي الاسطوانة . يلزمنا كم معلوماتي يساوي بيت واحدة كي نستطيع اتخاذ القرار المناسب حول الكفة التي سنضع عليها وزن المقارنة وتصلنا هذه المعلومة ضمن نظام درجة حرارته د . ما هي القيمة الدنيا للطاقة اللازمة لارسال بيت واحدة من المعلومات في درجة حرارة د . لقد حسبنا هذه القيمة للتو ، انها تساوي بالضبط ٦٩٣ ر. ث د جول ، تساوي هذه القيمة الاخيرة الحد الاعظمي للطاقة التي يمكن للآلة ان تولدها . ينطبق هذا من حيث المبدأ على الحالة الكوانتية ، اذا فعلنا اكثر ما هو ممكن وهكذا نستخدم كل خرج الآلة لبيت المعلومات الضرورية لاستمرار عمل هذه الآلة .

ان من المبعث ان نناقش ما هو فعلي وممكن تحقيقه في مقابل المردود المحدود لمثل هذه الآلة ، اذ انه وفي احسن الاحوال سنخرج من التجربة دون ربح أو خسارة .

لقد بينا الآن من خلال حالة بسيطة ان ارسال المعلومات وفق نهج نظرية الاتصالات يمكننا من تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية . ان واحدة البيت التي تقيس كمية المعلومات المستخدمة هي نفسها الواحدة التي نقدر بموجبها. انتروبي مصدر رسائل في نظرية الاتصالات . اما انتروبي الترموديناميك فتقرر اي جزء من الطاقة الحرارية يمكن تحويله الى طاقة ميكانيكية . يبدو طبيعياً ان نحاول ربط انتروبي الترموديناميك والميكانيك الاحصائي بانتروبي نظرية الاتصالات .

ان انتروبي نظرية الاتصالات هي قياس الرتبة فيما يتعلق باي رسالة من ضمن مجموعة ممكنة من الرسائل سيقوم مصدر الرسائل بتوليدها فعلاً في ظرف معين . اذا اختار المصدر رسالة من بين عدد م من الرسائل المتساوية الاحتمال ، تكون الانتروبي مقدرة بالبيت لكل رسالة مساوية للوغاريتم م من الاساس ٢ . يتضح انه يمكن بث الرسائل

في هذه الحالة باستخدام عدد من الأرقام الثنائية لكل رسالة مسلو ل
 لـ م . تبرز أهمية انتروبي نظرية الاتصالات بشكل عام ، من كونها
 تقيس مباشرة العدد الوسطي للأرقام الثنائية اللازمة لبث الرسائل التي
 يولدها مصدر رسائل معينة .

أما انتروبي الميكانيك الاحصائي فتقيس الرتبة المتعلقة بالحالة التي
 يمكن أن تكون فيها جملة فيزيائية . يُفترض في الميكانيك الاحصائي أن
 كل الحالات الممكنة ، المقابلة لطاقة معينة ، متساوية الاحتمال . تسوي
 انتروبي الميكانيك الاحصائي جداء ثابت بولتزمان في لوغاريتم عدد
 الحالات الممكنة مأخوذة بالنسبة للعدد النابيري e . ولهذه الانتروبي
 أهمية عظيمة في الميكانيك الاحصائي . ومن العلاقات الهامة ، تلك التي
 تعطي الطاقة الحرة :

$$ط ح = ط - ت \times د$$

حيث ط ح الطاقة الحرة ، ط الطاقة الكلية ، ت الانتروبي ، د
 درجة الحرارة . أن الطاقة الحرة بالتعريف ، هي ذلك الجزء من الطاقة
 الكلية الذي يمكن أن ينحول الى طاقة منظمة كطاقة جسم مرفوع .

أن فهم انتروبي الميكانيك الاحصائي يقودنا الى الحديث عن الجمل
 الفيزيائية جسماً صلباً متبلوراً أو حيزاً مغلقاً يحتوي على كمية من الماء
 والبخار أو زجاجة مليئة بالفاز ، أو أي مادة أو مجموعة من المواد .
 سنعتبر مثل هذه الجملة في حالة توازنها أي حالة استقرارها عند درجة
 حرارة معينة وعند الحد الذي تكون ثحل التفاعلات الفيزيائية والكيميائية
 الممكنة الحدوث قد أخلت عنده مداها .

نعتبر كمثال على الجمل الفيزيائية حالة غاز مكون من جسيمات
 لا متناهية الصغر تتطاير في كل اتجاه داخل وعاء حلر للفقر .

ان حالة هذه الجملة هي توصيف كامل ، او توصيف كامل بقدر ما نسمح قوانين الفيزياء ، لكل مواقع وسرع هذه الجسيمات فوق الميكانيك الكلاسيكي اي قوانين نيوتن في الحركة يكون لكل جسيم سرعته وطاقته وهكذا فهناك عدد مستمر لا نهاية له من الحالات ، كما ان هناك عددا لا نهاية له من النقاط واقعة على مستقيم او داخل مربع اما التناول الكوانتي لهذه الجملة فيصفها بعدد منفصل وغير مستمر وغير منته من الحالات . وهكذا يتشابه المنظور الكلاسيكي للمسألة مع مشكلة الاشارات المستمرة المقدمة في نظرية الاتصالات ، بينما يقابل التناول الكوانتي حالة الاشارات المنفصلة المكونة من رموز منفصلة مختلفة . ولقد تناولنا الحالة الأخيرة باسهاب في هذا الكتاب .

يحدد الميكانيك الكوانتي عددا معينا من سويات الطاقة يمكن لجزيء من غاز مثالي ان يحتل احدها ، وبما لعندها ان لهذا الجزيء سوية طاقية معينة كم ستكون انتروبي ذلك الغاز . اذا زدنا حجم الغاز فان ذلك ينعكس بزيادة في عدد سويات الطاقة المختلفة ضمن نفس مجال الطاقة السابق . ان هذا يزيد عدد الحالات التي يمكن للجملة ان تتخذها وبالتالي تزداد الانتروبي . يحدث مثل هذا الازدياد في الانتروبي اذا سمحنا لكمية من الغاز حبيسة في حيز معين ان تتمدد فجأة لتملا حيزاً أكبر .

اذا زدنا درجة حرارة غاز مع المحافظة على حجمه احتلت جزيئاته سويات طاقة أعلى ، واصبح بالامكان دمج سويات مختلف من الطاقة لتكوين سويات جديدة ياخصر يزيد عدد سويات الطاقة وتزيد الانتروبي بما لذلك .

اذا تحدد غاز بجوار مكبس بطيء الحركة ، ولم تضاف أي كمية من الحرارة الى الغاز ، تزداد السويات المختلفة في مجال معين للطاقة ، الا ان درجة الحرارة تهبط بحيث يبقى العدد الاجمالي لسويات الطاقة والانتروبي دون تغيير .

نستنتج إذن ، أنه من أجل نفس درجة الحرارة ، تكون انتروبي الغاز المتجمع في حيز صغير أقل من انتروبي نفس الغاز عندما يشغل حجماً أكبر . ينطبق هذا على حالة الغاز المكون من جزيء واحد في الشكل ١٠ - ٣ ، إذ تكون الانتروبي أقل عندما تكون الفتحة مغلقة والجزيء حبيس في أحد جانبي الاسطوانة ستكون الانتروبي ، أقل ، في الحد الأدنى عندما نعلم في أي من جهتي الاسطوانة يسبح الجزيء .

نستطيع بسهولة حساب نقصان الانتروبي الناجم عن خفض حجم غاز مكون من جزئي واحد الى النصف مع الحفاظ على درجة حرارته . يفضي خفض الحجم هذا الى انقاص عدد حالات الغاز وتنقص الانتروبي تبعاً لذلك بالمقدار التالي :

$$\Delta S = - R \ln 2$$

اما التغير المقابل في الطاقة الحرة فهو يساوي نظير حاصل ضرب تغير الانتروبي في درجة الحرارة أي : $\Delta G = - RT \ln 2$.

يساوي هذا التغير ، وفق ما تقدم ، العمل الذي نحصل عليه بتصنيف حجم الغاز المكون من جزيء واحد ومن ثم السماح له بالتمدد ودفع المكبس حتى يعود الى حجمه الاصلي . وهكذا فحساب الطاقة الحرة يفضي الى هذه العلاقة .

نستذكر انه في حالة الغاز ذي الجزئي الواحد تلزمنا كمية من المعلومات تساوي بيت واحدة لمعرفة موقع الجزيء ويجب أن نبث هذه المعلومة على خلفية من الضجيج تقابل درجة حرارة د ، وهذا بدوره يقتضي توفر $k_B T \ln 2$ من الطاقة .

عندما نعلم الآن ان الجزيء موجود في جهة معينة من المكبس ، فان الانتروبي تصبح أقل بـ $R \ln 2$. ث د مما لو كنا غير واثقين من الجهة التي يوجد فيها هذا الجزيء .. يقابل هذا الانخفاض في الانتروبي ازدياد في

الطاقة الحرة مقدرة ٦٩٣. ث د جول . نستطيع ان تحول هذه الطاقة الحرة الى عمل بالسماح للمكبس بالحركة نحرقم الاسطوانة غير المشغول حينما يدفعه الجزيء عبر اصطدامات متتالية بسطحه . ترتفع عند هذه النقطة الانتروبي الى قيمتها الاصلية وتكون قد حصلنا من الجملة على كمية من الطاقة ، الا ان هذه الطاقة تساوي مع الاسف الحد الادنى للطاقة اللازمة لبث المعلومات التي ابلغتنا عن الجهة التي يسبح الجزيء بها .

نعتبر الآن حالة اكثر تعقيدا . نفرض ان الجملة فيزيائية معينة عددا من الحالات م في درجة حرارة ثابتة واننا جزأنا هذه الحالات الى زمر تحتوي كل منها على $\frac{F}{N}$ حالة ، اي ان عدد الزمر هو ن .

نبحث الآن عن الخصائص المرتبطة بانتماء الحالة التي تكون عليها الجملة الى احدى هذه الزمر . ان انتروبي المصدر وفق نظرية الاتصالات هي ل ع ن بيت ، ذلك لان هناك ن زمرة من الحالات متساوية الاحتمال . يعني ذلك انه لتحديد الزمرة التي تقع فيها حالة الجملة أفيزيائية يلزم توظيف ن رقم ثنائي . اما بت هذه المعلومات في درجة حرارة د ، فيتطلب الطاقة :

$$٦٩٣. ث د ل ع ن = ث د ل ع ن \text{ جول}$$

اي ان الطاقة اللازمة لبث الرسالة تتناسب مع انتروبي مصدر الرسائل وفق نظرية الاتصالات .

اذا علمنا ان الجملة موجودة في إحدى حالاتها ذات العدد م ، تكون الانتروبية : ث ل ع م .

اما في حالة معرفتنا الأكيدة بان الجملة في حالة تنتمي لزمرة معينة من الزمر التي تحتوي كل منها على $\frac{F}{N}$ من الحالات ، تكون الانتروبي :

$$ث ل ع \frac{F}{N} = ث (ل ع م - ل ع ن)$$

وهذا يشابه حالة ما بعد الارسال حين نعتبر في أي من الحالات تكون الجملة .

ان تغير الانتروبي الناجم عن المعلومات المتعلقة بتحديد الزمرة التي تنتمي اليها حالة الجملة هو : - ث ل ع ن .

والزيادة المقابلة في الطاقة الحرة تسوي ث د ل ع ن .

يسوي هذا الطاقة الدنيا اللازمة لبث المعلومات المتعلقة بتحديد الزمرة التي تنتمي اليها حالة الجملة ، وهي المعلومات التي قادت الى إنقاص الانتروبي وزيادة القدرة الحرة .

نعتبر كمصدر رسائل أي عملية بإمكانها أن تفضي الى أي معطى يتعلق بالحالة التي قد تكون جملة ما قد اتخذتها . يولد هذا المصدر رسالة تخفض ربيتنا حول حالة الجملة المذكورة . ان لهذا المصدر ، وفق نظرية الاتصالات ، انتروبي لكل رسالة . تسوي هذه الانتروبي عدد الأرقام الثنائية اللازمة لبث الرسالة التي يولدها المصدر . ويلزم كمية معينة من الطاقة لارسال كل رقم ثنائي من الرسالة على خلفية من الضجيج تقل درجة حرارة د .

تخفض الرسالة ربيتنا فيما يتعلق بالحالة التي اتخذتها الجملة ، وهكذا تخفض أيضا انتروبي الجملة وفق الميكانيك الاحصائي ، وهذا التخفيض يزيد بدوره الطاقة الحرة للجملة ، الا ان هذا الازيداد يسوي اقيمة الصغرى للطاقة اللازمة لبث الرسالة التي أدت ازيداد الطاقة الحرة ، وهي طاقة متناسبة مع انتروبي نظرية الاتصالات :

اعتقد ان هذه العلاقة هي العلاقة المنشودة بين انتروبي نظرية الاتصالات وانتروبي الميكانيك الاحصائي . وهكذا علينا دفع ثمن ما للمعلومات التي تقود الى تخفيض انتروبي الميكانيك الاحصائي للجملة . يتناسب هذا الثمن مع انتروبي نظرية الاتصالات لمصدر الرسائل الذي يولد المعلومات . يجب ان يكون هذا الثمن مرتفعاً بما فيه الكفاية لكي تكون الآلة الدائمة الحركة من النوع الثاني مستحيلة .

يجب أن نلاحظ على كل حال أن مصدر الرسائل الذي يولد رسائل تتعلق بالحالة التي تكون عليها جملة فيزيائية ما ، هو مصدر خاص ومن نوع منفرد . تعتبر النصوص اللغوية المكتوبة أو المنطوقة من أكثر المصادر شيوعاً ، إلا أنه لا يهمننا على الإطلاق أن نربط أية انتروبي خاصة بها بانتروبي فيزيائية الطابع ، اللهم إلا من خلال الطاقة اللازمة لبث بيت واحدة من المعلومات في ظل ظروف مثالية للغاية .

تفضي معالجتنا السابقة أن ما هو غريب نوعاً ما ، فطاقة التي نبدلها لبث المعلومات من حالة جملة فيزيائية معينة تحول بيننا وبين معرفة الماضي بشكل مفصل . وإذا لم يكن بإمكاننا معرفة الماضي بشكل كامل ، فهل نعلم أن ذلك الماضي فريد زماته ؟ وهل هذا السؤال معقول حقاً ؟

أوجزنا في هذا الفصل بعض المشاكل المتعلقة بالاتصال كهربائياً في عالمنا الفيزيائي الواقعي . رأينا كيف أن بعض الظواهر الفيزيائية كالبرق والصواعق واجهزة إقلاع السيارات تنتج تشويشات كهربائية أو ضجيجاً يضاف إلى الإشارات الكهربائية التي نستخدمها لبث الرسائل . يسبب هذا الضجيج أخطاء في الإرسال كما يحدد من سرعة بث المعلومات عند استخدام طاقة وحزمة تواترات معينتين للإشارة .

أن الضجيج الصادر عن الأجسام الحارة هو ضجيج شامل بسيط ولا يمكن تجنبه وهو لذلك هام للغاية في كل أنواع الاتصالات . نشير هنا إلى أن كل جسم في الكون هو في نهاية المطاف جسم حار إذا كانت حرارته أعلى من الصفر المطلق . تظهر عند التواترات العالية الأثر التوائنتية وكذلك ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري ، ولقد رأينا تأثيرها في الحالة الحدية لحزمة لا نهائية العرض ، إلا أنه مع ذلك لا يوجد مقابل كوانتي للعلاقة :

$$ص = س (١ + \frac{ق}{ث د س})$$

أدى استخدام مصطلح الانتروبي في الفيزياء ونظرية الاتصالات على حد سواء إلى التساؤل عن إمكانية وجود علاقة بين هذين الوجهين للانتروبي . يمكن أن نبرهن في حالة بسيطة أن القيود المفروضة على إرسال المعلومات من قبل الضجيج الحراري تحول دون تصميم آلة يمكنها تحويل الطاقة الحرارية العشوائية إلى طاقة منظمة لثقل مرفوع ، إذ أن نجاح مثل هذه الآلة سيخرق القانون الثاني للترموديناميك . دعونا نعتبر أن بحثنا يتناول الحالة التي يمكن أن تكون عليها جملة فيزيائية معينة . كمصدر للرسائل . تساوي انتروبي هذا المصدر وفق نظرية المعلومات القدرة اللازمة لبث رسالة من المصدر على خلفية من الضجيج الحراري الموجود حتماً في الجملة المتبررة . إن الطاقة المستخدمة لبث مثل هذه الرسالة تساوي الإزدياد في الطاقة الحرة الناتج من الانخفاض في الانتروبي الفيزيائية الناتج بدوره عن الرسالة .



الفصل الحادي عشر السبيرنتيك

تملك بعض الكلمات مزايا خاصة فتمتها ما يشير مشاعر الرعب ، أو الإحساس بالغموض ، أو النشوة الشاعرية ، فلقد وصفت المثلة دويوي لامور بأنها (غريبة ودخيلة) وهي ترتدي السارونغ (اللباس الوطني في الملايو) . ولئن كنت لا أعلم بالضبط المعنى العام لهذه الصفة عند الناس ، إلا أنني واثق بأن كلمة أجنبي (وهي المعنى الأصلي لكلمة exotic التي ترجمناها بالغريب أو الدخيل) شاحبة المدلول أمام ذلك المعنى الشائع . كما أن كلمة (الرق) تجعلني أفكر بالمجلدات المفقودة التي كانت تحوي أسرار سليمان أو سواها من العقائد المسرية ، رغم أنني أعلم أن هذه الكلمة لا تعني أكثر من مخطوط أمحت كلماته لتفسح المجال لكتابة جديدة .

ونصادف أحياناً كلمات أو عبارات لا ترتبط بمعنى محدد وواضح وتحافظ خلال فترات استعمالها على سمتها السحرية البعيدة كل البعد عن أي تفسير خارج . فعبارتا (التاموس الأعظم) و (النزوة الحيوية) وكلمة (العزيرة) تمثل فيما أرى نماذج منها . لكنني لا أعتقد أن كلمة السبيرنتيك تنتمي تماماً إلى هذا النوع من الكلمات وأن كانت ذات نوعية محيرة وغير شعري .

يعرف وينر السبيرنتيك بأنه علم التحكم والاتصال في الكائنات الحية وفي الآلات وقد اقتبس الكلمة من المرادف اليوناني لمدلول موجه دقة

السفينة . لقد ظفر علم السيبرنيتيك بشهرة واسعة منذ نشر كتاب وينر حوله عام ١٩٤٨ . وإذا قبلنا بوجود علم السيبرنيتيك فيجب أن يكون هناك من يمارسه ، وهكذا ولد مصطلح عالم السيبرنيتيك للدلالة على الشخص المتخصص في السيبرنيتيك .

ما هو علم السيبرنيتيك ؟ إذا استشرنا كتاب وينر لوجدنا أن هذا العلم يضم على الأقل نظرية المعلومات التي أصبحنا الآن ملمين بها وبقدر كاف . إنه شيء يمكن أن نسميه نظرية في الصقل والتصفية والكشف والتنبؤ ، نظرية تهتم بالبحث عن الموجود في الحاضر وتنبأ بالقيم والإشارات المستقبلية المصحوبة عادة بشيء من المضجيج وأخيراً نظرية في الآلية المؤازرة والتنفيذية الراجعة السلبية التي اقتفى وينر أثرها حتى وصل لكتاب ألفه جيمس كلارك ماكسويل ، نشره عام ١٨٦٨ ، وتناول فيه موضوع المنظم (وهو الجهاز الذي يحافظ على سرعة ثابتة للآلة البخارية) . يجب أن نضيف ، على ما اعتقد ، علماً آخر هو علم الآلة والآليات المعقدة وهذا يتضمن تعميم وبرمجة أجهزة الكمبيوتر .

ويجب ألا ننسى كل ظواهر الحياة التي تشبه بشكل أو بآخر كل أو بعض ما أتينا على ذكره . وإن تضمها تحت لواء السيبرنيتيك ، وهنا نقفز إلى المذهب أمثلة عن بعض الوظائف السلوكية والتنظيمية للجسم ، إلا أن وينر يذهب إلى أبعد من ذلك ، ففي كتابه « أنا عالم رياضيات » يذكر أن عالم الاجتماع وعلم أصل الإنسان هما علمان أساسيان للاتصالات ، لذا يندرجان في قائمة اهتمامات السيبرنيتيك . ثم يستطرد ليقول إن علم الاقتصاد أيضاً يقع دائرة السيبرنيتيك سيما أنه أحد فروع علم الاجتماع .

لا نستطيع التشكيك بمصداقية وينر إزاء كل ما قدمناه إلا بصعوبة . لقد كان رايًا واضحاً فيما يتعلق بالتناول الإحصائي لعالم الحياة والفكر ، فبالنسبة له تحول تيار البحث الصاعد ، عبر ماكسويل وبولتزمان وجيبس ، إلى قاعدة فلسفية عريضة لديه ضمنها أيضاً أخلاقيات كيرغارد .

تكمُن المشكلة في أن كل منهج من المناهج العديدة التي وضعها وينر في بوتقة السيبرنيتيك له أغراضه ومجاله الخاص . ويقتضي الأسر استخدام آلاف الكلمات لشرح تاريخ ومضمون ومنظور كل منها . لذا فإن دمجها معاً يُمْنِي الحصول على تشكيل متباعد وغير متجانس سواء من حيث الكم أو الأهمية ، وهو لهذا أيضاً غير جذاب .

يتبين لنا مما تقدم سبب قلة عدد علماء السيبرنيتيك . وإذا أجرينا استفتاء بين جمهور العلماء من فحوى اختصاصاتهم لأجابت نسبة ضئيلة منهم « حقل السيبرنيتيك » . لو اعتبرنا من بين هؤلاء العلماء إخصائياً في الاتصالات ، أو الآلات الأوتوماتيكية المعقدة مثل أجهزة الكمبيوتر ، أو علم النفس التجريبي ، أو علم وظائف الجملة العصبية ، وأعدنا عليه سؤالاً بالبحا « هل تعمل في حقل السيبرنيتيك » ، لتأمل فينا طويلاً محلولاً فهم خلفياتنا وأهدافنا العلمية ، وإذا قرر أننا مجرد أناس غير متخصصين نحاول فهم ما يجري لا أكثر ، لأجابتنا عندها باقتضاب : نعم .

ما زالت كلمة السيبرنيتيك حتى الآن تحتل عناوين الصحف والمجلات غير المتخصصة ، إن لم نقل المجلات التي لا علاقة لها بالعلم على الإطلاق ، وربما أن بلكان هذه المجلات الإفاضة في امتداح السيبرنيتيك وتبيان مزاياه بأكثر مما يستطيعه العالم . وأؤكد في هذا المعرض الأهمية المستمرة لكتاب وينر « أنا عالم رياضيات » خاصة فيما يتعلق بأسس السيبرنيتيك يضم السيبرنيتيك ، كما قدمت ، حقولاً من المعرفة متنوعة ، وإن أضيقها هو في حقيقة الأمر واسع بعد ذاته لدرجة لا أجرؤ معها على الإسهاب بشرحه في كتاب واحد ، حتى لو بلغ حجمه أضعاف هذا الكتاب .

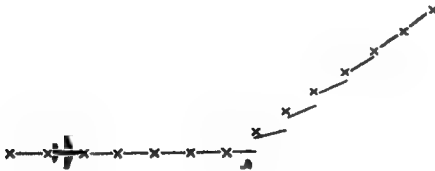
سأقتصر في هذا الفصل على محاولة عرض أفكار بسيطة تتعلق ببعض القضايا التكنيكية التي تتبادر إلى الذهن عند ذكر كلمة السيبرنيتيك . لن يكون هذا الموجز بدون فائدة ، إذ سيتمكن القارئ بفضل من كشف اهتماماته الشخصية لقراء السيبرنيتيك ، وإذا تبين أنه مهتم فعلاً ،

فسيضيف الموجز فائدة أخرى هي التعريف بنوعية المعلومات التي يتوجب على القارئ السعي وراءها لإرضاء اهتمامه .

نبدأ بالمرحلة الأولى لعلم السيرينتيك والتي دعوتها نظرية التنبؤ وهي ذات أهمية بالغة بحد ذاتها . إن هذه النظرية في واقع الأمر هي نظرية رياضية محضة ، إلا أننا نستطيع أن نجو بمض قضاياها بمثال عملي .

نفرض أننا أمام مشكلة استخدام معلومات رادارته نبقي بواسطتها تسديد مدفع مضاد للطائرات بهدف إسقاط طائرة معادية . يعطينا الرادار سلسلة من قياسات يحدد كل منها موقع الطائرة بخطأ طفيف . يتوجب علينا أن نستخرج من هذه المعلومات مسار وسرعة الطائرة مما يمكننا من التنبؤ بمواقعها في فترات لاحقة ، ومن ثم إطلاق قذيفة مناسبة إلى أحد تلك المواقع وإسقاط الطائرة بالتالي .

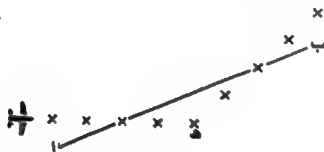
نفرض ثبات سرعة وارتفاع الطائرة . يوضح الشكل ١١ - ١ المعلومات الرادارية عن المواقع المتتالية للطائرة بإشارة x . نستطيع أن نرسم خطاً بالنظر أ ب يمكن أن يكون جزءاً معقولا لمسار الطائرة كيف نستطيع تعليم الآلة لتقديم مثل هذا التنبؤ ؟



الشكل ١١ - ١

إذا طلبنا من الكمبيوتر أن يستخدم المعلومة الأخيرة ل ، والمعلومة السابقة لها مباشرة ن ل ، لرسم الكمبيوتر قطعة مستقيمة مبرهاتين النقطتين طبعاً هذا الإجراء خاطيء ، وعلى الكمبيوتر استخدام المعلومات السابقة أيضاً .

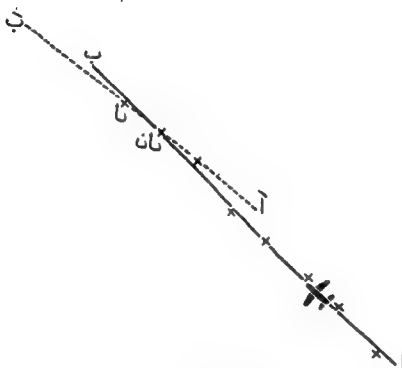
تجسد أبسط أساليب التبادل بالنسبة للكمبيوتر في اعتبار كل النقاط واعطاء أوزان متساوية لها . إذا تصرف الكمبيوتر بهذه الطريقة وحاول ملائمة خط مستقيم لكل النقاط مأخوذة دفعة واحدة ، يحصل ربما على نتيجة كتلك الموضحة في الشكل ١١ - ٢ ، حيث قلمت الطائرة بانمطاف عند النقطة ه ، لهذا فالمسار آ ب الذي حدده الكمبيوتر لا علاقة له بمسار الطائرة من وجهة النظر العملية .



الشكل ١١ - ٢

نستطيع معالجة هذه المشكلة بإعطاء أهمية أكبر للمعلومات الحديثة بالمقارنة مع المعلومات السابقة . وأبسط طرق تطبيق هذه الفكرة هي طريقة التنبؤ الخطي . يعالج الكمبيوتر في التنبؤ الخطي كل معلومة على حدة ، (والمعلومة هنا قد تكون بعد وجهة الطائرة بالنسبة لموقع الرادار) حيث يضرب كل معلومة بعدد يتوقف على حداثة هذه المعلومة ، إذ سيكون هذا العدد أكبر كلما كانت المعلومة أحدث . يجمع الكمبيوتر بعد ذلك كل هذه الجداءات وينتج بذلك نبوة على هيئة معلومة جديدة ، مثلاً بعد وجهة الطائرة بالنسبة للرادار عند لحظة لاحقة .

يمكن أن تكون نتيجة هذا التنبؤ وفق ما هو مرسوم في الشكل ١١-٢



الشكل ١١ - ٢

لقد تم هنا استخدام التنبؤ الخطي لحساب موقع وجهة متقدمين للطائرة كلما توفرت معلومة رادارية جديدة ممثلة في الشكل بإشارة x . وهكذا فمسار الطائرة المحسوب هو خط مستقيم ينطلق من الموقع المحسوب وفق الاتجاه المحسوب ، ويبقى هذا المسار ممتداً حتى ورود معلومة رادارية جديدة . نلاحظ أن الكمبيوتر يأخذ وقتاً طويلاً حتى يدخل في اعتباره حقيقة انعطاف الطائرة عند النقطة هـ ، رغم أننا أدركنا هذا الأمر مباشرة عند رؤيتنا الموقع الذي يلي النقطة هـ .

يستخدم التنبؤ الخطي المعلومات السابقة بكفاءة عالية ، إلا أن استجابته للمعلومات الجديدة تنسم بكونها استجابة بطيئة ، علماً بأن

هذه المعلومات ليست على اتساق مع سابقتها ، كالمعلومات التي حصلنا عليها في حالة الطائرة بعد انعطافها عند النقطة هـ . إذا حاولنا زيادة سرعة استجابة التنبؤ الخطي للمعلومات الجديدة ، فسننجم في ذلك ، إلا أننا سنقع في مطب آخر ، فالتنبؤ الخطي إذ ذاك لن يستخدم المعلومات القديمة بالكفاءة المطلوبة حتى لو كانت متسقة مع المعلومات الجديدة .

إن تحقيق التنبؤ الجيد حتى في حالة تبدل الظروف ، كما حدث عند انعطاف الطائرة ، يتم باستخدام التنبؤ غير الخطي ، وهذا النوع من التنبؤ يعتمد كل أساليب التنبؤ وليس فقط على ضرب المعلومة بعدد يتناسب مع قدمها ثم جمع الجداول .

نورد فيما يلي مثالا بسيطا عن التنبؤ غير الخطي . نفرض أن لدينا متنبئين خطيين مختلفين ، ياخذ الأول بعين الاعتبار آخر مجموعة من المعلومات ثم تلقيها في حدود ١٠٠ معلومة ، بينما يعتبر الثاني العشرة الأخيرة من المعلومات فقط . نفرض أننا سنستخدم كل متنبئ على حدة لحساب ما ستكون عليه المعلومة التالية التي سترد ، ثم نقرن المعلومة الواردة فعلا بكل التنبؤين . نصوغ معيارا للاختبار بين المتنبئين وفق ما يلي . نفرض أن المتنبئ الأول استطاع تقديم ثلاثة تنبؤات كانت أقرب للمعلومات الفعلية ، عندها نتبنى هذا المتنبئ الأول ، وإلا فنفرض أن الطائرة تناور بطريقة تقلل وفقها من أهمية المعلومات القديمة ، ولا نجد عندها مناصاً من تبني المتنبئ الثاني . إن هذه الطريقة في الوصول إلى التنبؤ النهائي هي طريقة غير خطية ، إذ لم تتم صياغة التنبؤ بمجرد ضرب كل معلومة بعدد يتوقف على قدمها ، بل على العكس زدنا أو قللنا من اهتمامنا بالمعلومات القديمة وفق طبيعة المعلومات الجديدة .

وبشكل عام ، هناك عدد لا نهاية له من طرق التنبؤ غير الخطي وفي الواقع ، فالتنبؤ غير الخطي ومعه كل العمليات الأخرى الغير خطية ، هي المجموعة الشاملة لكل الطرق لتباعدة ، بعد استثناء أبسط الأساليب

اي التنبؤ الخطي والعمليات الخطية الاخرى . نعرف اليوم الكثير من التنبؤ الخطي ، ولا نعلم بالمقابل إلا القليل عن التنبؤ غير الخطي .

اوردنا مثال التنبؤ بمواقع الطائرة لكي نمكن القارئ من تحسس الفكرة التي كانت ستبدو لا معنى لها لو عرضناها بشكلها المجرد . الا اننا مع ذلك نستطيع طرح المسألة الاعم .

لنتخيل عدداً من الاشارات الممكنة . يمكن ان تتكون هذه الاشارات من اشياء متباعدة كمسارات محتملة للطائرات أو كلمات مختلفة قد ينطق بها انسان ما ، ولنتخيل ايضاً بعض الضجيج أو التشويه ، فلربما أن المعلومات الرادارية غير دقيقة بما فيه الكفاية ، أو أن الرجل يتحدث في غرفة ملأى بالضجيج . نطلب منا في هذا الوضع حساب بعض أوجه الاشارة الصحيحة : مثلاً : الموقع الحالي أو المستقبلي للطائرة ، الكلمة التي نفوه بها الانسان للتو أو التي سيتفوه بها بعد قليل . نستخدم معلوماتنا الاحصائية عن الاشارة لاتخاذ قراراتنا المناسبة ، ويمكن أن يكون من بين هذه المعلومات : المسارات الأكثر احتمالاً للطائرات ، أو عدد مرات الانعطاف وحدة كل انعطاف ، كما يمكن لهذه المعلومات الاحصائية أن تضم أصناف الكلمات الأكثر شيوعاً واحتمال ورودها بالنسبة لما يسبقها . نفرض أخيراً أن لدينا معلومات احصائية مشابهة من الضجيج والتشويه .

يتضح أننا نستخدم هنا نفس نوعية المعلومات التي توظفها نظرية الاتصالات . إلا أننا في نظرية الاتصالات نعتبر مصدراً للمعلومات وقناة ذات ضجيج ، ثم نبحث عن اميز طريقة لترميز الرسائل التي يولدها المصدر بغية بثها بأجود الشروط عبر القناة المفروضة ، أما في التنبؤ فننتقل من مجموعة من الاشارات شوهها الضجيج ثم نتسائل عن كيفية كشف الاشارة الفعلية ، أو حساب جانب منها أو التنبؤ به ، مثلاً كقيمة الاشارة عند لحظة مستقبلية .

يتألف الجهاز الرياضي للتنبؤ من النظرية العامة للتنبؤ الخطي التي أبدعها كولوموغروف ووينر ، الى جانب التحليل الرياضي لعدد من نوع خاص من المتنبئين اللاخطيين . اشعر انني لا أستطيع المخي ابداع من هذه الصبغة ، الا اننا لا نستطيع ان اقاوم اندفاعي لاعطاء مثال من نتيجة نظرية اعتبرها مدهشة ، وقد صاغها سليبيان ، وهو رياضي طبعاً .

لنتخيل حالة اشارة خافتة قد تكون او لا تكون محاطة بضجيج قوي . ومهمتنا ان نقرر فيما اذا كانت الاشارة موجودة فعلاً أم لا . يمكن ان يكون الضجيج والاشارة كمونات كهربائية او اتضافات صوتية . نفرض ان الضجيج والاشارة قد اتحدتا باضافة احدهما للآخر بكل بساطة ، وان كلا منهما عبارة عن مصدر مستقر ولكل منهما حزمة تواتر محددة . نضيف اننا نعلم وبدقة طيف تواتر الضجيج ، اي بشكل اوضح ملءي نسبة طاقة الضجيج الواقعة في كل حيز صغير من مجال التواترات ، بينما طيف تواترات الاشارة مخطف عن ذلك . اثبت سليبيان اننا اذا استعلمنا قياس الكمون الكلي او ضغط الصوت للاشارة مع الضجيج وبشكل دقيق عند كل لحظة من اي فترة زمنية مهما كانت قصيرة ، نستطيع تحديد فيما اذا كانت الاشارة موجودة مع الضجيج ام لا وبدون خطأ يذكر ومهما كانت الاشارة خافتة . نشير الى ان هذه النتيجة هي نتيجة نظرية وليست مجرد تطبيق عملي مفيد . لقد كانت نظرية سليبيان هذه بمثابة الصدمة للكثيرين سيما اولئك الذين اكدوا انه اذا كانت الاشارة ضعيفة بحد معين ، بل وحسبوا ذلك الحد ، فانه لا يمكن كشفها بتفحص مجموع الاشارة والضجيج خلال اي فترة زمنية .

ساوضح ، قبل اخلاق هذا الموضوع العام ، لماذا ربطت به صفتي للتنبؤ والكشف ، اضافة لصفتين آخريين هما الترشيح والتنعيم . اذا كان طيف التواتر للضجيج المختلط مع الاشارة مختلفاً عن طيف تواترات الاشارة ، امكننا فصل الاشارة عن الضجيج باستخدام مرشح كهربائي يقطع التواترات السائدة في الضجيج بالمقارنة مع التواترات السائدة في الاشارة . اذا استخدمنا مرشحاً يقتلع كل او معظم مركبات لتواتر

المالية التي تنفّر بسرعة مع الوقت ، فاننا نحصل على خرج ابطا في تنفّر بالمقارنة مع الدخّل ، نقول عندها اننا قمنا بتنميم مزيج الاشارة والضجيج .

تحدثنا حتى الآن عن جملة من العمليات نجريها على مجموعة من المعلومات بهدف حساب الاشارة الحاضرة او المستقبلية وكذلك كشفها . ويرتب على هذا الحساب و الكشف فعل ما ننوي القيام به .

من الممكن مثلاً ان ندفع طائرة صديقة لطائرة عدوة او نستخدم الرادار لمراقبة الطائرة العدو . يزودنا كل واحد جديد بمعلومات قد تجعلنا نغير خطتنا ازاء العدو .

تعرف الآلية المؤثرة على انها جهاز يعمل بشكل مستمر استناداً لقاعدة معلوماتية بهدف تحقيق غاية ما وضمن معطيات متغيرة . لدينا الآن عنصر هام جديد ، فالرادار يقيس موقع الطائرة العادية بالنسبة لطائرنا وهكذا تستخدم معلومات الرادار لتقرير التغييرات الضرورية في موقع طائرنا . تفدّى معلومات الرادار بشكل راجع يؤدي لتغيير معلومات الرادار التي سترد في وقت لاحق ، ذلك لان هذه المعلومات تستخدم في تغيير موقع الطائرة الذي سيتم عنده استقصاء المعلومات الرادارية الجديدة . توصف التغذية الراجعة بكونها سلبية لانها تستخدم لانقاص الابتعاد المحتمل عن سلوك معين بدلاً من زيادته .

يمكننا ببساطة تصور امثلة اخرى عن التغذية الراجعة السلبية . يقيس منظم السرعة في الآلة البخارية سرعة تلك الآلة ، تستخدم القيمة المقاسة لفتح او اغلاق الصمام بحيث تتم المحافظة على السرعة عند حد معين . وهكذا تفدّى نتيجة قياس السرعة بشكل راجع لتغيير تلك السرعة . يقيس الترموستات حرارة الغرفة ويطفئ تباً لذلك او يشعل اجهزة التدفئة بحيث يحافظ على درجة حرارة ثابتة للغرفة . عندما يمشي احدنا في يديه صينية فيها ماء ، قلته يجنح الى مراقبة الماء

وموازنة الصينية بحيث لا ينسكب الماء ، الا ان لهذا نتائج سيئة ، فكلما امل صديقنا الصينية بهدف منع انسكاب الماء تحرك الماء بشكل اعتف في الصينية . عندما نطبق التغذية الراجعة لتغيير عملية بالاستناد الى حالتها الملاحظة يصبح وضعا يرمته غير مستقر ، بكلمة مختصرة بدلا من انقاص الانحرافات الصغيرة بالنسبة للهدف المرسوم ، يمكن ان تؤدي التغذية الراجعة لزيادة تلك الانحرافات .

ان هذا مشوش للغاية في حالة دارجات التغذية الراجعة . اذا اردنا جعل التصحيحات أكثر كمالا علينا تقوية التغذية الراجعة . الا ان هذا يفضي بدوره لعدم استقرار الحملة ، والجملة غير المستقرة ليست مرغوبة كما هو معلوم ، اذ ان مثل هذه الجملة قد تفضي الى سلوك مشابه لابتعاد الصاروخ عن الطائرة المادية بدلا من ملاحقتها ، ولانخفاض درجة حرارة الغرفة وارتفاعها على شكل قفزات ، او لاسراع آلة معينة وتوقفها واخيرا لبث اغنية ما من مضخم دون تغذية ذلك المضخم بأي دخل .

لقد درس استقرار أنظمة التغذية الراجعة السلبية بعناية فائقة ، وقد تم تحصيل كم معلوماتي كبير من هذه الأنظمة ، حيث تسوي السعة الحالية مجموع السمات السابقة مضروبة بأعداد تتناسب مع البعد الزمني لتلك السمات من اللحظة الراهنة .

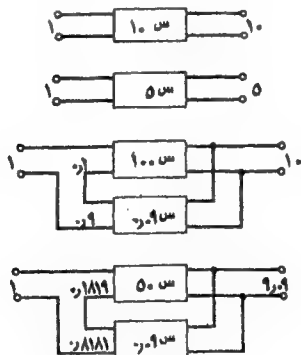
تتمس أنظمة التغذية الراجعة السلبية بكونها إما مستقرة او غير مستقرة وذلك بصرف النظر عن الاشارات المفداة اليها . اما أنظمة التغذية الراجعة غير الخطية فيمكن ان تكون مستقرة لبعض انواع الدخل وغير مستقرة لانواع اخرى . تمثل السيارة القديمة غير المتماكة والمرجفة نظاما لا خطيا ، اذ يمكن ان تكون حركتها مستقرة على طريق سوي ناعم ، الا ان تنوءا صغيرا قد يصادفها سيجعلها ترتجف وسيستمر ذلك الارتجاج حتى بعد تجاوزها للتنوء بمسافة طويلة .

لقد غطى معظم الجهد النظري المبذول في مجال أنظمة التغذية الراجعة السلبية ، قطاعا آخر من الموضوع لم نتطرق اليه بعد ويتعلق بجهاز

اخترعه هارولد بلاك عام ١٩٢٧ يعرف باسم المضخم ذي التغذية الراجعة السلبية .

يعرف مردود المضخم على انه نسبة كمون الخرج الى كمون الدخل .
 تبرز اهمية خاصة لاستخدام مضخمات ذات مردود ثابت في الهاتف
 وفنون الالكترونيات الاخرى ، الا ان الانابيب المفرغة والترانزستورات
 هي اجهزة غير كاملة اذ يتغير مردودها مع الوقت كما يتوقف ذلك المردود
 على قوة الاشارة . تلعب المضخمات ذات التغذية الراجعة السلبية دوراً
 أساسياً في التقليل من اثر هذه التغيرات في مردود الترانزستورات
 والانابيب المفرغة .

يتضح لنا سبب ذلك من خلال تفحص الشكل ١١ - ٤



الشكل ١١ - ٤

لدينا في الأعلى مضخم عكسي مردوده عشرة ، أي إذا طبقنا كمون
 داخل مقداره ١ فولط على اليسار ، نحصل على كمون خرج مقداره ١٠
 فولط على اليمين . نفرض أن الردود انخفض إلى النصف ، نحصل
 بذلك على كمون خرج مقداره ٥ فولط كما هو مبين في القسم التالي من
 نفس الشكل .

يوضح القسم الثالث من الشكل مضخماً ذا تغذية راجعة سلبية مسم
 لتحقيق مردود قدره عشرة . وهو يتألف من علبتين ، العليا هي مضخم
 مردوده مئة يربط خرجه إلى عبة تقسيم كمون دقيقة للغاية لا تحتوي
 على ترانزستورات أو أنابيب ولا تتغير بتغير الوقت أو تغير مستوي
 الإشارة . يتألف دخل العبة العليا من كمون الداخل ١ فولط مطروحاً
 منه خرج العبة السفلى وهو يساوي جدار ٠.٩. في كمون الخرج ١٠
 فولط أي ٩ فولط .

نفرض الآن أن الأنابيب أو الترانزستورات في العبة العليا تتمرض
 للتغير ، بحيث تعطي العبة مردود خمسين بدل الردود السابق المساوي
 لمئة ، يوضح القسم الأخير من الشكل هذه الحالة . نشير إلى أن الأرقام
 المعطاة فيه هي مجرد أرقام تقريبية ، إلا أن الملاحظة المطلوبة هي أن
 انخفاض الردود إلى النصف لم يؤثر على المخرج بأكثر من ١٠ ٪ ، ولو
 كان هذا الردود أعلى لكان الأثر على المخرج أقل .

لا يمكننا التقليل من أهمية التغذية الراجعة السلبية إطلاقاً ،
 فالمضخمات من هذا الطراز هامة في الاتصالات الهاتفية ، كما أن
 الترموستات مثال حي على نجاعة استخدام هذه التغذية . تستخدم
 التغذية الراجعة السلبية للتحكم في العمليات الكيميائية في المصانع و في
 متابعة الصواريخ للطائرات المأدية . كما أن الطيارين الآليين على متن
 مختلف أنواع الطائرات يستفيدون من التغذية الراجعة السلبية في
 الحفاظ على الطائرة ضمن مسار معين .

ويشكل أكثر عمومية ، استخدام التغذية الراجعة السلبية من ميني الى يدي لتوجيه القلم أثناء الكتابة ، وكذلك من اذني الى لساني وشفتي لتعلم الكلام أو تقليد صوت آخر . تستخدم عضوية الحيوانات التغذية الراجعة السلبية بأشكال مختلفة ، وهذا مثلاً ما يجعلها تحافظ على درجة حرارة ثابتة في داخلها رغم تقلبات الطقس حولها ، وكذلك يمكنها من تثبيت الخصائص الكيميائية للدم والنسج . يطلق على قبلية الجسم للاحتفاظ بقطاع محدد من الخصائص رغم تغير المحيط اسم التوازن البدني .

يمد ج. روس . آشي واحداً من كبار علماء السيبرنيتيك ، وقد كان معلم نفسه . بنى آشي آلة دعاها موازن البدن لعرض تظاهرات الموازنة مع البيئة التي يعتقد أنها تشكل الميزة الأولى للحياة . وقد زودها بعدد من دوائر التغذية الراجعة وأسطين لتغييرها ، يتحكم في واحدة منها الموازن البدني ، بينما يتحكم في الأخرى الشخص الشرف على تشغيل الآلة والذي يلعب دور البيئة . إذا تغيرت دوائر الآلة استجابة للبيئة بحيث تصبح في حالة عدم استقرار ، فإن الآلة لا تلبث أن تعيد ضبط الدوائر بالمحاولة والخطأ بهدف العودة الى الاستقرار مرة ثانية .

يمكننا إذا شئنا تشبيه سلوك الموازن البدني هذا بحالة طفل يحاول تعلم المشي دون أن يقع ثم تعلم قيادة الدراجة دون أن ينقلب وكذلك بحالات أخرى كثيرة نتعرض لها في حياتنا . يؤكد وينر في كتابه « السيبرنيتيك » على دور التغذية الراجعة السلبية كعامل هام للتحكم العصبي ، كما يؤكد أن بعض الإعاقات كارتجاج الأيدي تسبب مباشرة من اضطراب نظام التغذية الراجعة السلبية في الجسم .

عرضنا حتى الآن ثلاثة مكونات للسيبرنيتيك : نظرية المعلومات ، الكشف والتنبؤ بما في ذلك التنميط والترشيح ، وأخيراً التغذية الراجعة السلبية متضمنة الآليات الواعدة والمضخات ذات التغذية الراجعة السلبية . نقرن عادة أجهزة الكمبيوتر والأدوات المعقدة الأخرى المشابهة

مع السيبرنيتيك . تستخدم كلمة الائمة احيانا للاشارة الى هذه الآلات المتقدمة .

يمكن للباحث أن يجد التكنولوجيا المعاصرة جلورا في اتجاهات المقرون الفابرة ، الا أن دراسة تلك الاصول لن تقدم الكثير الى صعيد فهم هذه التكنولوجيا . يتعلم الانسان بالعمل ومن خلال التمثل بما عمله . لقد زادت امكالات العمل في حقل الآلات المعقدة بشكل لم يسبق له مثيل بالمقارنة مع الازمان السالفة كما أن معرضات التفكير قد تنامت الى حدود لا يمكن الاحاطة بها .

ان تقني الآثار التاريخية الآلات المعقدة يصل بنا الى المقاسم الهاتفية الآلية التي شاهدت النور لأول مرة في النصف الثاني من القرن الماضي ، وكانت تلك المقاسم بدائية تعمل بأسلوب الخطوة - خطوة حيث تصمد آلية محددة لتوضيع قطاع معين من حلقة الاتصال الهاتفية كلما تم تسجيل أحد مكونات الرقم الهاتفي الذي ننوي مخاطبة صاحبه . تطورت هذه المقاسم الى أنظمة التحكم الشاملة ، حيث لا تشغل الأرقام فواطع المقسم بشكل مباشر ، اذ يخزن الرقم أولا او يمثل كهربائيا او ميكانيكيا في أحد أجزاء المقسم . تختبر بعد ذلك آلية كهربائية في جزء آخر من المقسم اللاترات الكهربائية التي يمكن استخدامها لوصل طالب للمخابرة بالرقم المطلوب حتى يجد واحدة غير مشغولة يستخدمها لتحقيق الاتصال المنشود .

تسم المقاسم الحديثة بتعقيد بالغ وحجوم كبيرة ، اذ تصمم اصلا لوصل كل مدن وقرى قطر معين ببعضها في شبكة اتصال مباشر ، لذا تعد هذه المقاسم قمة التكنولوجيا التي ابدعها الانسان ويستدعي وصف جزء من عملها مدداً كبيراً من الكلمات . ان ادارة قرص التلغون تعني اليوم البحث عن اكثر الخطوط اقتصادية لاستخدامها في وصل الطالب بالرقم المنشود ، وربما في عملية التفاف حول العديد من المدن اذا كان معظم الخطوط مشغولا . وما يفعله المقسم بعد تحقيق الاتصال هو

توقيت المخبرة وقياس مدتها وتحديد أجرتها تبعاً لذلك ، كما أنه سيفصل كل الدارات المرتبطة إذا قطع أحد الفريقين المخبرة ، وما هو أهم من ذلك أن القسم يبلغ كومبيوتراً مركزياً عن الأعطال التي قد تحدث فيه ، ويستمر بالعمل رغم حدوث تلك الأعطال .

لعل من أهم مكونات القسم الهاتفية العناصر المعروفة باسم الحاكمت الكهربائية . تتألف الحاكمة الكهربائية من مغناطيس كهربائي ذي نواة مغناطيسية تقف قبالتها رقاقة معدنية صغيرة متحركة تطلق في أحد اتجاهي حركتها دائرة كهربائية عندما تمس قطعاً أخرى مثبتة (على غرار آلية عمل الجرس الكهربائي) . عندما يمر التيار الكهربائي في وشيعة المغناطيس الكهربائي ، تنجذب الرقاقة المغناطيسية وتحرك ، وتكون النتيجة أن بعض الرقاقات المتحركة تبعد عما يقابلها من القطع المثبتة فتفتح قسماً من الدارات ، بينما تقترب رقاقات متحركة أخرى من قطع مثبتة مقابلة وتطلق قسماً آخر من الدارات .

طبق ج. و. ستينيز من شركة بيل في الثلاثينات من هذا القرن تكنولوجيا الحاكمت والمركبات الأخرى للقاسم الهاتفية في بناء آلة حاسبة كبيرة كان بإمكانها تنفيذ العمليات الحسابية الأربعة مهما بلغت من التعقيد . تابعت شركة بيل إنتاج أجهزة الكومبيوتر وفق نفس الأسس أثناء الحرب العالمية الثانية لأغراض عسكرية . أما هوارد ايكن وزملاؤه فقد بنوا أول كومبيوتر يعتمد الحاكمت الكهربائية في جامعة هارفارد عام ١٩٤١ .

أتت الخطوة الأساسية في زيادة السرعة لأجهزة الكومبيوتر بعد فترة قصيرة من الحرب على يد ج. ب. ايكرت و ج. و. موشلي اللذان بنيا جهازايناك وهو كومبيوتر يعتمد الانابيب المفرغة ، وقد حلت مؤخراً الترانزستورات والدارات المتكاملة محل الانابيب المفرغة في بناء أجهزة الكومبيوتر .

وهكذا فقد كانت الفترة الحاسمة من تاريخ الآلات المقعدة هي فترة
تحققها وتصميمها ، أولاً باستخدام الحاكمات ومن ثم باستخدام الإنابيب
المفرغة والترانزستورات .

لم يتحقق بناء الأجهزة المقعدة عند توفر العناصر المطلوبة وحسب ،
بل كان من الواجب رسم المخططات السليمة لربطها ببعضها بنية تنفيذ
مهمات معينة كالتقسيم والضرب . كان من أهم أعمال ستيبيتز وشانون
تطبيق جبر بول ، وهو فرع من المنطق الرياضي ، على توصيف وتصميم
الدوائر المنطقية .

وهكذا فقد تكامل بناء الآلات المقعدة للهدف لحل مشاكل معينة
بتوفير المركبات المناسبة وإبداع التصميم المتكررة لربطها ببعضها . إن
التنظيم ، وهو جوهر الآلة ، أساسي وحاسم ، إلا أن الآلة لم تكن لتوجد
لولا تصنيع مكوناتها .

كانت الآلة الحاسبة التي بناها ستيبيتز بلا روح ، إذ كان المشغل
يقدها بزوج من الأعداد العقدية فتتهز وترتجفه ، ثم تستجيب بإعطائه
المجموع ، الفرق ، الجداء ، أو حاصل القسمة . إلا أنه استطاع عام
١٩٤٣ تصنيع كومبيوتر باستخدام الحاكمات ، كان يطلق التعليمات
(أي البرنامج) بواسطة شريط ورقي طويل ، وكان هذا البرنامج يتضمن
العمليات المطلوب إجرائها والأعداد التي ستجري عليها هذه العمليات .

تحققت خطوة متقدمة في الكومبيوتر عندما أصبح بالإمكان الاستعانة
بقسم سابق من شريط البرنامج لإكمال مهامه ، أو استخدام شريط برنامج
جانبى للمساعدة في حساباته . لقد أصبح بإمكان الكومبيوتر في هذه الحالة
لاتخاذ قرار ما عند بلوغه نقطة معينة ، ومن ثم متابعة العمل استناداً لهذا
القرار . نفرض أن الكومبيوتر كان بصدد حساب المتسلسلة التالية :
وذلك بإضافة حدودها حداً إثر حد :

$$..... + \frac{1}{1.1} - \frac{1}{1} + \frac{1}{7} - \frac{1}{6} + \frac{1}{3} - 1$$

يمكن أن نبرمج الكمبيوتر بحيث يتابع إضافة الحدود حتى يقابل حداً أقل من $\frac{1}{1000000}$ ويطبع المجموع عند ذلك ثم ينصرف إلى حسابات أخرى . يتخذ الكمبيوتر قران يطرح آخر حد قام بحسابه من $\frac{1}{1000000}$ ، فإذا كانت النتيجة سالبة قام بحساب حد جديد وإضافته إلى المجموع السابق ، أما إذا كانت النتيجة موجبة طبع المجموع إذ ذاك على الطلبة وانتقل إلى الجزء التالي من البرنامج لمعالجة بقية التعليمات .

اقترنت التقفرة الكيفية الكبيرة التالية في تطوير أجهزة الكمبيوتر باسم جون فون نويمان الذي وسع استخدام أجهزة الكمبيوتر الأولى في حسابات تتعلق بالتقابل الدورية . لقد امتلكت ، حتى أجهزة الكمبيوتر الأولى ، مخازن أو ذاكرات ، يحفظ فيها وبشكل مؤقت النتائج المتوسطة للحسابات التي لا تليق أن تستخدم في إكمال هذه الحسابات ، كما تحتفظ تلك الذاكرات بالنتائج النهائية «مهيأاً» لطبعها . طرح فون نويمان فكرة تخزين البرنامج في ذاكرة الكمبيوتر بدلاً من تقديته به على شريط ورقي . لقد جعل ذلك التعليمات في متناول الآلة ، كما مكّنها من تغيير بعض هذه التعليمات بناءً على نتائج الحسابات المرغوبة .

كانت الأرقام العشرية تخزن في الآلات الحاسبة القديمة على دواليب مستنة صمم كل منها ليأخذ عشرة أوضاع مختلفة . أما اليوم فتحفظ الآلات الحاسبة الحديثة وأجهزة الكمبيوتر بالأعداد في صيغتها الثنائية ضمن صفوف عديدة من الدارات المتكاملة . تقتضي المحافظة على المعلومات ضمن هذه الدارات توفير مصادر دائمة للتيار الكهربائي وبكميات قليلة ، يدمى تخزين المعلومات بهذا الأسلوب ، التخزين السريع الزوال ، لأن انقطاع التيار الكهربائي يحوّل المعلومات من الذاكرة . يمكننا رفع

الوثوقية من تخزين المعلومات بزيادة الاجرامات الكفيلة بمنع انقطاع او اضطراب التيار الكهربائي .

إن الطراز القديم للذاكرات كان يحافظ على المعلومات رغم انقطاع التيار . اذ كانت الذاكرة تتألف بشكل رئيسي من مغناط حلقية تخترقها جملة من الاسلاك الكهربائية ، وكانت تلك المغناط توضع في صفوف متوازية ، وتمثل جهة تمغنت الحلقة رقماً ثنائياً معيناً . إن انقطاع التيار لا يؤثر على تمغنت الحلقات ، لذا تبقى المعلومات كما هي لدى هذا الانقطاع ، اللهم إلا اذا حدث تشويش معين في التيار أدى الى تغيير بعض الجاهات التمغنت بشكل خاطئ ، مما يتسبب في الاحتفاظ بمعلومات خاطئة . جمعت هذه الذاكرات لدى اختراعها بالذاكرات المركزية .

توصف الذاكرات المركزية وذاكرات الدارات المتكاملة بأنها للكرات عشوائية التناول . إذ يمكن استرجاع أي زمرة من الأرقام الثنائية من الذاكرة في جزء من الميكروثانية (الميكروثانية جزء من مليون من الثانية) بمجرد تغذية الذاكرة بزمرة أخرى من الأرقام الثنائية هي العنوان من الذاكرة حيث تقع الزمرة المنشودة . ترصف الأرقام الثنائية عادة في زمرة مكونة من ثمانية أرقام تدعى بايت ، أو ستة عشر رقماً تدعى كلمة .

كانت الأرقام الثنائية تخزن ، في أيام الكمبيوتر الأولى ، على هيئة نقوب في شريط ودي ، أما الآن فتخزن وفق تشكيلات مغناطيسية بالفة الدقة على اشربة او اقراص مغناطيسية . وهكذا نشهد الكاسيتات الشبيهة بكاسيتات آلات التسجيل في أجهزة الكمبيوتر الصغيرة والشخصية ، اذ توفر هذه الكاسيتات بيئة رخيصة لتخزين المعلومات . يوصف تخزين المعلومات على الاشربة او الاقراص المغناطيسية بكونه تسلسلي ، إذ حتى نصل معلومة معينة نرغب بالتعامل معها ، لا بد أن نتجاوز كل ما سبقها من المعلومات . وهكذا فان تخزين التسلسلي ابطأ بكثير من التخزين العشوائي ، وهو يستخدم لخزن كمية كبيرة من

المعلومات ، أو تخزين البرامج والمعلومات التي تنتقل وبشكل متكرر الى ذاكرات التناول العشوائي . تستخدم الاشرطة المغناطيسية في حفظ نسخة اضافية عن كل البرامج والمعلومات الهامة كإجراء احتياطي في حال إصابة ذاكرة التناول العشوائي أو الأقراص المغناطيسية باعطال قد تؤدي للإسداء الى المعلومات المتوضعة في هذه الأوساط .

تضم أجهزة الكمبيوتر إضافة للذاكرة والتخزين ، وحدات الحساب التي تنفذ كل العمليات الحسابية والمنطقية وتنتج تمثيلاً لها . ووحدة التحكم التي تضبط تدفق التعليمات وتنفيذها وكذلك الاتصال بأجهزة الإدخال والإخراج ، كما يمكن أن يضاف الى الكمبيوتر وحدات أخرى لتنفيذ مهمات خاصة كتحويل فورييه وقلب المصفوفات وغيرها .

يتوجب على مستخدم الكمبيوتر الذي يرمي لإجراء عمليات محددة، حتى لو كانت بقصد التسلية ، أن يكتب برنامجاً مفصلاً يُطلع من خلاله الكمبيوتر على أدق التفاصيل المتعلقة بتلك العمليات .. كان المبرمجون الأوائل يبدلون جهوداً جبارة لتحقيق ذلك ، إذ كما هو معلوم يتعامل الكمبيوتر داخلياً مع الأرقام الثنائية ، لذا كان على هؤلاء كتابة البرامج بالترميز الثنائي مباشرة .

إلا أن الكمبيوتر يمكن أن يترجم سلاسل الأحرف والأرقام العشرية الى سلاسل مقابلة من الأرقام الثنائية وفق قواعد معينة . كما يمكن كتابة برامج جزئية لتنفذ مهام جزئية غير ملحوظة في مبنى الكمبيوتر الرئيسي ، مثلاً حسب مساحات نموذجية مطلوبة على الدوام في الأعمال الطبوغرافية . لذا تم تطوير اللغات التجميعية والتي يطلق عليها أيضاً اسم لغات الآلة ، وهي تقع في مرحلة متوسطة بين التهج الثاني الذي يتبعه الكمبيوتر في داخله ، وبين لغات البرمجة المتقدمة التي يتعامل مستخدم الكمبيوتر بموجبها مع الكمبيوتر .

عندما يكتب المبرمج برنامج بالغة التجميعية ، عليه أن يكتبه في خطوات متتالية ، كما أنه يستطيع تحديد مجموعات الخطوات الجزئية التي على الكمبيوتر اتباع أي منها في حال تحقق شرط ما أو عدم تحققه ، تكون نتيجة ما أكبر أو أصغر أو مساوية لقيمة أخرى . إلا أن الأرقام التي يكتبها في مثل هذا البرنامج هي أرقام عشرية ، كما أن التعليمات بسيطة في شكلها مما يسهل عملية استدكلها ، مثلاً كتليمة CLM وهي اختصار CLEAR ADD ، أي تخلية وجمع ، ويعني ذلك وضع العدد صفر في المراكز ثم إضافة العدد الموجود في عنوان معين من الذاكرة إلى هذا المركز .

لا شك أن كتابة البرنامج بلغة الآلة ، أي باللغة التجميعية هي عملية متعبة للغاية . تنسم أجهزة الكمبيوتر بأنها عملية لأن لها أنظمة تشغيل يمكن للكمبيوتر من خلالها وباستخدام عدد بسيط من التعليمات أن يقرأ المعلومات ويطبها وأن يؤدي وظائف أخرى ، والسبب الرئيسي في ذلك أن برامج الكمبيوتر تكتب عادة بلفات البرمجة المتقدمة ، وحتى أنظمة التشغيل تكتب بهذه اللغات .

يزداد عدد لفات البرمجة المتقدمة في كل يوم ، ومن أهم هذه اللغات هي لغة الفورتران FORTRAN ، وهي منحوتة بالأجنبية من كلمتين : FOR من FORMULA أي العلاقة بين بعض المتغيرات ، و TRAN من TRANSLATION أي ترجمة ، وهي من أقدم لفات البرمجة وأكثرها دواماً ، وتستخدم بشكل رئيسي في التطبيقات العلمية ، واكتمال على تعليمية وفق هذه اللغة ، نورد التعليمات التالية :

IF Z < 80 GOTO 7

ويعني ذلك أنه إذا كانت قيمة المتغير Z أقل من 80 ، فعلى الكمبيوتر أن يترك التنفيذ المتسلسل لتعليمات البرنامج وأن يقفز إلى الموقع من البرنامج المحاذي للرقم 7 . أما إذا كان Z أكبر أو يساوي الـ 80 فيتابع الكمبيوتر تنفيذ البرنامج وفق التسلسل الطبيعي لتعليماته .

تعتبر لغة الباسيك أبسط من لغة الفورتران ، لذا فهي أوسع انتشاراً . أما لغة البرمجة المسماة بالاجنبية C فتستخدم بشكل رئيسي في كتلة أنظمة التشغيل والحسابات العددية . واقع الامر أن لغات البرمجة تجتج نحو البساطة عندما تصمم لتحقيق أغراض معينة كالحسابات العددية أو معالجة النصوص اللغوية وكذلك تمثيل الجمل الكهربائية أو الميكانيكية أو الاقتصادية . تقاس البساطة هنا بزم التشغيل الكمبيوتر اللازم لإنهاء إحدى هذه المهمات .

يحول البرنامج من صيغته المكتوبة بإحدى لغات البرمجة المتقدمة إلى لغة الآلة باستخدام نظام إضافي يسمى المترجم وهو ينفذ هذا التحويل على مجمل البرنامج دفعة واحدة ، وهناك نظام من نوع آخر يحول البرنامج سطراً بعد سطر ، يطلق على هذا النظام اسم المفسر والمترجمات أكثر فعالية وشيوعاً . يصاحب إدخال البرنامج إلى الكمبيوتر تشغيل برامج أخرى تجهز بها أجهزة الكمبيوتر بشكل مسبق ومهمتها تصحيح أخطاء الإدخال دون الحاجة لإعادة إدخال كامل التعليمات التي حصل فيها الخطأ .

ينتشر تعلم البرمجة اليوم في كل الأوساط بدءاً من الأطفال المدارس الابتدائية حتى طلاب الجامعات مروراً بالراحل الثانوية ، كما تشترط كل الجامعات على المتقدمين للحصول على شهادة الدكتوراه بمختلف الفروع ، أن يلعوا يلماً جيداً بالكمبيوتر والبرمجة .

يدخل استخدام الكمبيوتر قطاعات جديدة من الحياة في كل يوم ، كما أصبح جزءاً لا يتجزأ من قطاعات أخرى كفزو الفضاء وصنع السيارات ومتابعة عمل المصانع الكيميائية وجرد المستودعات وحجز الأماكن في الفنادق ومكاتب السفريات وتشكيل الطيوف الثلاثية الأبعاد وإخراج الأفلام السينمائية ولعب المباريات وقراءة النصوص وتأليف الأعمال الموسيقية السيئة بالطبع والخالية من أي مضمون إنساني . وأعداد أخرى من التطبيقات يضيق المجال عن ذكرها هنا . استطاعت تكنولوجيا الحفارات المتكاملة توسيع قاعدة الانتاج لأجهزة الكمبيوتر لدرجة دخل معها الكمبيوتر كل بيت وأصبح وسيلة ناجحة للتسلية .

تتسم طوم البرمجة بسهولة تعلمها حتى من قبل الأطفال ، إلا أن أعداد البرامج الهادفة لحل مشاكل معينة هي مهمة صعبة للغاية ، وتزداد صعوبة هذه المهمة كلما كان الكمبيوتر أصغر حجماً .

تنفق اليوم أموال طائلة لأعداد البرامج الطويلة والمعقدة ، ربما أكثر مما تنفق على تحسين الأجهزة ذاتها . يستطيع مبرمج حلاق إعداد برنامج قصير ينفذ وظائف معينة بينما قد يتعثرون آخرون في أعداد برنامج مماثل . ويكاد يكون معيار استخدام الكمبيوتر وجود المبرمج الجيد قبل وجود الكمبيوتر الجيد ، ولأننا نرى أعداد كافية من المبرمجين المهرة لتغطية الاحتياجات الواسعة لاستخدام الكمبيوتر في مختلف المجالات .

وربما ذلك فقد فشل أروع المبرمجين في جعل الكمبيوتر ينفذ أعمالاً محددة . يقوم الكمبيوتر بكل ما يطلب منه ، بشكل أدق لا يستطيع الكمبيوتر القيام بوظائف لا يفهم المبرمج أصلاً فحواها وكل تفاصيلها تستغرق الحسابات الإلكترونية في كثير من الأحيان وقتاً طويلاً وتكلف مبالغ كبيرة ، ولكن في كثير من الأحيان نجد أنفسنا عاجزين عن استخدام الكمبيوتر لمهمة معينة . أما عن أهم المشاكل التي لم نستطع حلها حتى الآن باستخدام الكمبيوتر فهي في واقع الأمر كثيرة ونعد منها : طباعة الكلام المنطوق والترجمة من لغة لأخرى وبرهان نظريات رياضية متقدمة وتأليف موسيقى ممتعة .

سمى الكثيرون لحل بعض أو كل المشاكل التي أشرنا إليها ، وقد أدى ذلك إلى بروز إبحاث جديدة وهامة تتعلق بتفاصيل هذه المشاكل وما يترتب عليها ، تمييز الأحرف المكتوبة ، بناء اللغة ، استراتيجيات الألعاب ، أسس التأليف الموسيقي ، ونظريات البرهان الرياضي .

أدى التصدي لحل المشاكل المعقدة وغير العادية على الكمبيوتر إلى تعميق فهمنا لعملية الإدراك . وهكذا إذا تحدث أحد العلماء المعاصرين عن أحاطته بالسلوك الإنساني في ظروف معينة أو علمه بطريقة حل مسألة رياضية أو منطقية معينة ، فما يحدث في أغلب الأحيان هو أن يحاول

ذلك العالم أثبت ما ذهب إليه بتصميم برنامج للكمبيوتر يمثل السلوك المعنى أو يغطي تفاصيل البرهان المنشود. أما إذا لم يستطع هذا الدارس توظيف الكمبيوتر في أبحاثه ، فسيبقى فهمه لموضوع بحثه غير كامل . أو ربما غير حقيقي ومضللاً .

هل سيتمكن الكمبيوتر من التفكير ؟ لا نستطيع أن نربط معنى محدداً بهذا السؤال إذا لم نفهم أولاً ما نقصده بكلمة تفكير . يعرض ملوفن مينسكي ، وهو رياضي متميز له اهتمامات كبيرة في مجال أجهزة الكمبيوتر واستخدامها ، الحوار القصير التالي . يتحدث الناس من لاعب شطرنج قدير يطلب كل اللاعبين الآخرين يقولهم : « يا له من عبقرى فد ، يا لعظمة المخ الذي يمتلكه ، أنه مفكر كبير فعلاً » . يوجه السؤال التالي الى هذا اللاعب : « كيف تستطيع هزم كل خصومه في اللعب » ، فيجيب : « لدي قواعد معينة أطبقها في الانتقال الى اللعبة التالية » . يعلق المستمعون بسخط « إن هذا ليس تفكيراً إطلاقاً ، فنحن نزاء عملية ميكانيكية محضة » .

يرغب مينسكي من ذلك ان يؤكد ان الناس يجنحون الى تعريف التفكير على أنه تلك العمليات التي تستعصي على فهمهم . ساذب أبعد من ذلك وأقول إن الكثيرين يعتبرون عملية تفكير أي خلط للكلمات الهامة في صيغ إعرابية مقبولة . اعمد في بعض الحالات لحل مشاكل فكرية الطابع رغم انها ميكانيكية في فحواها . على كل حال يبدو ان الفلاسفة والمفكرين سيثابرون على تبني تعريف للتفكير يكون التفكير بمقتضاه كل ما تعجز الآلة من عمله في مرحلة معينة . لن يسبب هذا التعريف لي أي ازعاج سيما إذا كان مبهماً لأصحابه ، وان كنت اعتقد انه يستحيل من حيث المبدأ التفريق بين ما يمكن للإنسان عمله وما يمكن بالمقابل للآلة ان تعمله ، حتى عند اعتبار ما طرحه العالم الرياضي البريطاني تيورينغ عام ١٩٣٦ عن لعبة التقليد .

يسند الدور الرئيسي في هذه اللعبة الى باحث يكون على صلة بإنسان ويكمبيوتر عن طريق لوحتي أزرار ، إلا أنه لا يدري أي اللوحتين

ترتبط بالإنسان أو الآلة . يحاول هذا الباحث اكتشاف صلة كل من اللوحيتين بطرح الأسئلة ، وقد تمت برمجة الكمبيوتر بهدف خداع الباحث . ان نجاح اللعبة المتجسد بتفليل الباحث تماما يتجاوز امكانيات الكمبيوتر والبرمجة في العصر الحاضر ، ويحتاج ربما لعدة مئات من السنين ، وقد لا يكون من الممكن تحقيقه ابداً .

رابعا ان السيبرنيتيك هو مجال بالغ السعة ، فهو يتضمن نظرية الاتصالات التي افردنا لها كتابا كاملا ، كما يتضمن التنبؤ والتنميع البالي الأهمية في التطبيقات الرادارية والمسكوية ، فوق وينر ، عندما نحاول تحديد الموقع الحقيقي لطائرة سواء في اللحظة الراهنة او في المستقبل إنما نتعامل في هذه الحالة مع السيبرنيتيك . وكذلك نكون على احتكاك مع السيبرنيتيك عندما نستخدم مرشحا كهربائيا لفصل الضجيج من تواتر معين من الإشارة من تواتر مختلف .

توكل انجل وينر في هذا المجال الواسع ، وكان عمله الكبير النظرية العامة للتنبؤ الخطي حيث يتم التنبؤ بضرب كل معلومة برقم يتناسب عكسا مع قديمها ثم جمع النتائج .

اما المكونة الأخرى للسيبرنيتيك فهي التنفيذ الراجعة السلبية . يعمل الترموستات وفق هذه التغذية عندما يتابع درجة الحرارة في غرفة ويطفئ او يشعل تبعا لذلك جهاز تدفئة للحفاظ على درجة حرارة ثابتة في الغرفة ، كذلك شأن الطيارين الآليين عندما يديرون أجهزة الطائرة لتثبيت ارتفاع الطائرة وجهة طيرانها . وأخيرا يستخدم بنو البشر التغذية الراجعة السلبية للتحكم بحركة ايديهم أثناء قيامهم بالأعمال المختلفة .

قد تكون أجهزة التغذية الراجعة السلبية غير مستقرة ، اذ يمكن ان يؤدي الخرج احيانا لإبعاد السلوك وبشكل كبير من الهدف المنشود . يزمو وينر الارتجاف لدى الإنسان وبعض أمراقه الأخرى الى خلل في آلية التغذية الراجعة السلبية لديه .

تستخدم التغذية الراجعة السلبية ايضا في توفير شكل إشارة
الخرج الكبيرة من مضخم مع إشارة الدخل الصغيرة . لقد كان لهذه
التغذية اهميتها القصوى في نظرية الاتصالات قبل ظهور السيبرنيتيك .

ابرز السيبرنيتيك اهمية الاعمته المتمثلة بالالات المعقدة كقاسم
الهاتف التي اتقضى على ظهورها فترة طويلة ، واجهزة الكمبيوتر التي
وضعت في الاستخدام بعد الحرب العالمية الثانية .

اذا كان الامر كذلك ، فيضم السيبرنيتيك بين جناحيه كل محصلة
التكنولوجيا المعاصرة باستثناء انتساج الآليات الضخمة . نجد في
السيبرنيتيك المعارف المتلقة بتنظيم وعمل البيولوجيا الانسانية .
وتنصر في بوبقته كل الأبحاث الحديثة في العالم ، ففي هذه البوطة
تتوضع المشاكل الاجتماعية ، الفلسفية ، وكذلك الاخلاقية .

وهكذا اذا وصفنا انسانا ما بكونه عالم سيبرنيتيك ، فإن ذلك لن
يعطينا فكرة محددة عن مجال تخصصه ، إلا اذا كان هذا الانسان مقربا
شعوليا بشكل استثنائي إذ ليس بالضرورة ان يحيط عالم السيبرنيتيك
بكل تفاصيل نظرية المعلومات .

ولحسن الحظ ، فالتليل من العلماء يعتبرون انفسهم اخصائيي
سيبرنيتيك ، إلا اذا استثنينا احاديث بعضهم ان يعتبرونهم في حالة
فقر بالنسبة لقواعدهم المعلوماتية . وهكذا اذا كان السيبرنيتيك غامضا
ومتندا ، فان ذلك لن يضر كثيرا . ويبقى مصطلح السيبرنيتيك مفيدا
جدا ، وهو يضيف بهجة كبيرة للإنسان ، او لوضوع البحث ، وحتى
لكتاب . وهذا ما هدفت اليه هنا ، ان اضيف قليلا او ربما كثيرا من
البهجة في هذا الكتاب .



الفصل الثاني عشر

نظرية المعلومات وعلم النفس

قرأت حول موضوع نظرية المعلومات وعلم النفس أكثر مما أذكره أو أحتاجه لاهتماماتي . وكان معظمه منصباً على ربط مصطلحات جديدة بأفكار قديمة غامضة ، إذ أن الآمال كانت متمحورة حول إمكانية توضيح تلك الأفكار بفعل سحري بمجرد طرح كلمات جديدة .

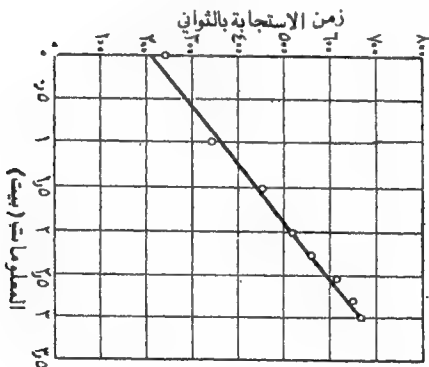
إلا أن بعض تطبيقات نظرية المعلومات في حقل علم النفس التجريبي قيمة . يصعب أن نستنتج من هذه المعلومات أحكاماً نهائية ومؤكدة ، إلا أنها تشكل قاعدة ، أو ربما سبباً ، لتخمينات مشيرة ساحل في هذا الفصل عرض بعض التجارب البسيطة والمفهمة المرتبطة بنظرية المعلومات وعلم النفس . وقد تمت بانتقائها من خلال خبرتي الشخصية واهتماماتي أشير هنا إلى ضرورة فرض بعض التحفظات لدى تناول أي موضوع واسع وغير واضح المعالم بشكل كامل .

يبدو لي أن رد الفعل الأولي لعلماء النفس تجاه نظرية المعلومات انبثقت من كون الانثروبي معياراً شاملاً ومتميزاً لكمية المعلومات ، ومن حقيقة استخدام الكائن الإنساني للمعلومات . يعني ذلك بشكل ما أن صعوبة مهمة معينة ، متمثلة في الزمن اللازم لانجها ، إنما تتناسب مع كمية المعلومات المتوفرة .

توضح هذه الفكرة في تجارب أجراها رأي هايمان وهو عالم نفس تجريبي ونشرها في مجلة علم النفس التجريبي عام ١٩٥٣ ساقطر هنا على عرض تجربة واحدة من عدة تجارب أجراها هايمان .

توضع عدة أضواء أمام الشخص المختبر . وقد ربط كل ضوء بكلمة وحيدة المقطع تم ابلاغ الشخص المعني عنها تبدأ التجربة بإشارة تنبيه يعقبها وميض أحد الأضواء ثم يطلب من الشخص المختبر ذكر اسم الضوء بالسرعة الممكنة . تقاس الفترة الزمنية الفاصلة بين الوميض ونطق الشخص المختبر باسم الضوء الذي 'نظر' .

كانت التجربة تجري في بعض الأحيان على ثمانية أضواء يومض أحدها بشكل عشوائي على أساس احتمالات متساوية تكافئ هذه الحالة المعلومات المنقولة للشخص المختبر ، والتي تمكنه من تمييز الضوء بشكل كامل ، لع ٨ أو ٣ بيت . كان عدد الأضواء في بعض الحالات ٧ (٢٨٨ بيت) أو ٦ (٢٥٨ بيت) أو ٥ (٢٣٢ بيت) أو ٤ (٢ بيت) أو ٣ (١٥٨ بيت) أو ٢ (. بيت) رسم بعد ذلك الخط البياني المثل نلزم الفاصل بين الوميض وذكر اسم الضوء ، أي زمن الاستجابة بدلالة كمية المعلومات مقدرة بالبيت كما في الشكل ١٢ - ١ .



الشكل (١٢ - ١)

يتضح أن هنالك وقت استجابة معيناً حتى في حالة استخدام ضوء وحيد ، فالاختيار بين الاضواء أكيد وكمية المعلومات المنقولة في هذه الحالة تساوي الصفر . عندما يزداد عدد الاضواء ، يزداد زمن الاستجابة بشكل مطرد مع كمية المعلومات المنقولة . أن هذا الازدياد المناسب مع لوغار يتم عدد البدائل كان قد لوحظ من قبل عالم نفس الماني هو ج. ميركيل عام ١٨٨٥ . تبدو هذه النتيجة الحقيقية مؤكدة قليلة لل تكرار عن السلوك الانساني .

نلاحظ من الشكل ١،٢ - ١ أن ازدياد زمن الاستجابة هو حوالي ١٥ر. ثانية لكل بيت . يذهب بعض علماء النفس غير المتحفظين الى التأكيد بأنه يلزم الانسان حوالي ١٥ر. ثانية للاستجابة لكمية من المعلومات تساوي ١ بيت . وهكذا فالسعة المعلوماتية للانسان هي $\frac{1}{15}$ بيت في الثانية . هل يعني ذلك أننا قد وضعنا اليد على ثابت عام للدراك أو التفكير الانساني ؟

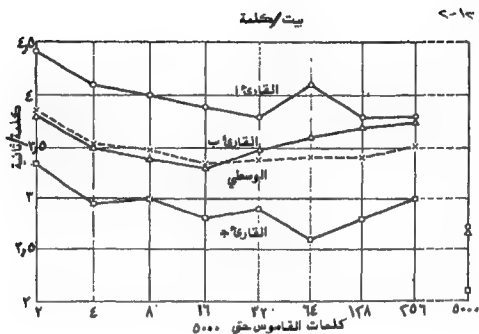
يتناسب ازدياد زمن الاستجابة في تجربة هايمان مع الرتبة في المنبه مقاسة بالبيت . الا ان التجارب المختلفة التي اجراها علماء متميزون افضت الى نتائج متباينة . وأكثر من ذلك . فقد أوضح كل من ج. هـ. موبراي و م. ف. رودس عام ١٩٥٩ ، أنه بعد كثير من المرات يتغير اداء الشخص بحيث يصبح زمن الاستجابة مستقلاً عن المحتوى المعلوماتي . يبدو ان الكائنات الانسانية تمتلك طرائق متعددة لتناول المعلومات ، فهناك طريقة ستستخدم في التعليم حيث يلعب عدد البدائل دوراً مهماً ، وطريقة أخرى تبرز بعد قطع مراحل كبيرة من عملية التعلم حيث يختزل دور البدائل الى نطاق محدود . بل ويبدو أثر كمية المعلومات في تجربة أخرى محدداً منذ البداية ، حيث يجب على الشخص المختبر أن يضغط مفتاحاً أو أكثر من أصل عدة مفاتيح تلمسها أصابعه بمجرد إحساسه باهتزاز المفتاح أو المفاتيح المعنية .

وأكثر من ذلك ، اذا كان زمن الاستجابة مساوياً فعلاً لكمية ثابتة يضاف إليها زيادة ما مناسبة للمحتوى المعلوماتي ، فإنه يبقى من غير الاكيد ان نحصل على سرعة معلوماتية هامة بقسمة الوقت على عدد وحدات البيت . سنرى ان ذلك سيفضي الى سرع معلوماتية خيالية من خلال التجربة التي سأعرضها فيما يلي .

اجرى هـ كواستلار تجارب مبكرة على السرع المعلوماتية حيث كان على الشخص المختبر ان يعرف سلاسل عشوائية من القطع الموسيقية كما اجرى ج. س. برو. ليكلاندر تجارب على سرعة القراءة والتأشير . بدأت مع ج. اي. كارلين ، وقبل علمنا بهذه الانجازات ، سلسلة مس التجارب حول قراءة قوائم من الكلمات ، وهي تعطي بالمقارنة مع النوعيات الاخرى من التجارب ، اكبر سرعة معلوماتية ملحوظة ، مثلاً اكبر من سرعة ارسال رموز مودس ومن سرعة الطبع بالالة الكتلية .

نفرض ان المرسل يختار ابجدية مؤلفة مثلاً من ١٦ كلمة ثم يعتمد الى اعداد قائمة باجراء خيارات عشوائية من بين هذه الكلمات وعلى اساس احتمالات متساوية . تساوي كمية الخبر في هذه الحالة ولكل كلمة لع ١٦ = بيت . يبت الشخص المختبر المعلومات عبر ترجمتها الى شكل جديد هو شكل الخطاب بقراءته القائمة بصوت مرتفع . فاذا كان بإمكانه مثلاً القراءة بسرعة ٤ كلمات في الثانية يكون بإمكانه بث المعلومات بسرعة $4 \times 16 = 64$ بيت في الثانية .

يوضح الشكل ١٢ - ٢ المعلومات الخاصة بثلاثة اشخاص مختبرين . وقد تم انتقاء الكلمات الخمسمائة الأكثر استخداماً في اللغة الانكليزية . يلاحظ انه بينما تنخفض سرعة القراءة نوعاً ما بالتحول من القاموس اللغوي ذي الكلمتين الى القاموس ذي الاربعة كلمات (او من ١ الى ٢ بيت لكل كلمة) ، تبقى هذه السرعة ثابتة تقريباً للقواميس التي تحتوي من ٤ الى ٢٥٦ كلمة (او من ٢ الى ٨ بيت لكل كلمة) .



الشكل ١٢ - ٢

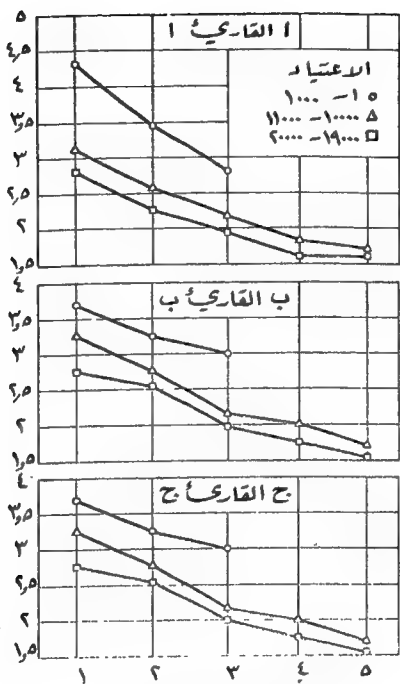
نستذكر الآن طريقة استخراج السرعة المعلوماتية من معلومات كتلك التي عالجها هايمان ، أي ملاحظة الازدياد في الوقت المقابل لازدياد كميات المعلومات المقدرة بالبيت بالنسبة للمنبه . لنندقق في الخط الوسطى المتقطع من الشكل ١٢ - ٢ . لا تتناقص سرعة القراءة إطلاقاً بالتحول من ٢ بيت للمنبه الى ٨ بيت للمنبه ، أي أن التغير في زمن القراءة لكل كلمة هو صفر ، رغم الازدياد في الكم المعلوماتي بمعدل ٦ بيت لكل كلمة إذا قسمنا ٦ على صفر نحصل على سرعة معلوماتية تساوي اللانهاية طبعاً هذا مضحك ، ولكنه لا يبقى كذلك في حالة استنتاج السرعة بطريقة هايمان أي بقسمة ازدياد الكم المعلوماتي مقدراً بالبيت على زيادة زمن الاستجابة .

نستنتج مباشرة من الشكل ١٢ - ٢ ان القارىء ٢ يقرأ الكلمات المؤلفة من ٨ بيت بسرعة ٢٨/٨ في الثانية ، وهكذا فهو يبت المعلومات بسرعة $٨ \times ٢٨ = ٢٠٨$ في الثانية . واكثر من ذلك ، عندما يتم اختيار كلمات القائمة وبشكل عشوائي من قاموس يضم ٥٠٠٠ كلمة (١٢٣ بيت لكل كلمة) ، فانه عند ذلك سيقرا بسرعة ٢٧ في الثانية محققا سرعة معلوماتية اكبر هي ٣٣ بيت في الثانية .

يتضح انه لا توجد سرعة معلوماتية وحيدة يمكن ربطها بلقاء الكائن البشري ، اذ ان باستطاعة هذا الكائن بث المعلومات (وكما سنرى فيما بعد الاستجابة لها او تذكرها) في شروط معينة بشكل افضل من حالة شروط اخرى . واحسن صورة يمكننا ان تكونها عن الانسان انه قناة او جهاز ناقل للمعلومات له خصائص وقدرات محددة . الا انه جهاز في منتهى المرونة اذ بإمكانه تناول المعلومات بأشكال عدة واحسن ما يكون عليه هذا التناول في حالة كون المعلومات مرمزة بشكل مناسب لقابلياته .

ما هي هذه القابليات ؟ نقرأ من الشكل ١٢ - ٢ ان الانسان يبطيء بكميات طفيفة لدى ازدياد التعقيد ، فهو يستطيع قراءة قائمة من الكلمات مختارة بشكل عشوائي من ابجدية فيها ٢٥٦ كلمة تقريبا بنفس السرعة في حالة ابجدية فيها ٤ كلمات فقط . انه ليس بسرعة الآلات ، ولكي نحسن من اداؤه علينا مطالبته بتنفيذ مهمات معقدة . هذا هو ما كان ممكنا ان نتوقعه .

لان التعقيد يبسطه في النهاية ، كما نرى في حالة الابجدية المكونة من ٥٠٠ كلمة . ربما ان هناك ابجدية مثلى لكل كلمة فيها عدد من وحدات البيت ، وبحيث ان عدد الكلمات لن يبطيء عملية القراءة بشكل ملحوظ . قمت انا وكارولين ، في محاولة منا لايجاد هذه الابجدية ، بقياس سرعة القراءة بدلالة عدد المقاطع ودلالة الاعتدال اي فيما اذا كانت الكلمة منتقاة من الكلمات الالف الاولى الاكثر شيوعا او من الكلمات العشرة الالف الاولى . يوضح الشكل ١٢ - ٣ هذه التجارب .



طيات في الثانية

عدد المقاطع لكل كلمة
الشكل ١٢ - ٣

لاحظ انه بينما يؤدي ازدياد عدد المقاطع الى انخفاض سرعة القراءة يؤدي نقص الاعتماد الى نفس النتيجة تقريباً . وهكذا فقد يكون القاموس المعتاد والمكون من الكلمات وحيدة المقطع هو الأنسب . استطاع أحد القراء تحقيق سرعة قراءة مساوية لـ ٣٧ كلمة في كل ثانية ، أي ٢ بيت في كل ثانية باستخدام قاموس مؤلف من الكلمات الوحيدة والاكثر استخداماً او اعتياداً والبالغ عددها ٢٥٠٠ كلمة (٢٥٠٠ كلمة يعني ١١٨ بيت لكل كلمة) .

تملك الفقرات النثرية المكتظة ، أي تلك النصوص التي تنتقى كلماتها على أساس تكافؤ الاحتمال ودون روابط اعرابية ، سرعة معلوماتية عالية كحالة النصوص غير التكنيكية . وتساوي الانثروبي في حالتها ١١٨ بيت لكل كلمة وسرعة القراءة ٣٧ كلمة في الثانية والسرعة المعلوماتية المقابلة ٤٤ بيت في الثانية .

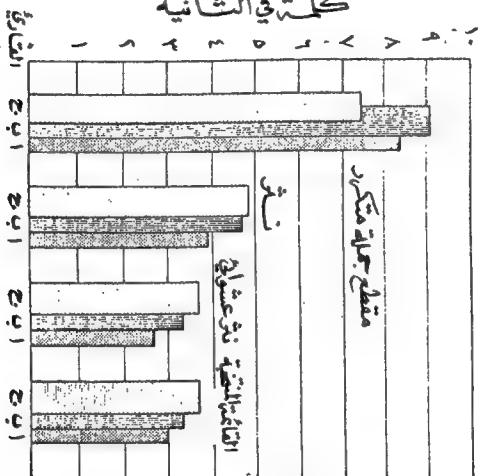
اعتقد اننا نستطيع احراز كسب ما بتحسين الابجدية ، إلا ان هذا الكسب سيكون غير ذي أهمية . وعلى كل حال ، اعطت هذه التجارب أعلى سرعة معلوماتية أمكن الحصول عليها ، وهي سرعة صغيرة وفق معايير الاتصالات الكهربائية ، الا أنها مع ذلك تمثل عدداً كبيراً من الخيارات النائية ، حوالي ٢٥٠٠ في الدقيقة .

ما هو الشيء الذي يحد من هذه السرعة ؟ هل هو قراءة الكلمات حرفاً بحرف ، اذا كان الامر كذلك ، تعتبر اللغة الصينية أحسن لغات العالم لان فيها شارة معينة لكل كلمة ، الا ان الصينيين الذي يقرؤون قوائم عشوائية . من الاحرف الصينية ومقابلاتها من الكلمات الانكليزية يفعلون ذلك بنفس السرعة .

هل يمكن أن تكون القيود على السرعة ميكانيكية الطابع يوضح الشكل ١٢ - { السرعة لمهام مختلفة اذ يبين كيف يستطيع أحد الأشخاص استظهار مقطع بضعف سرعته في قراءة مقطع عشوائي التركيب منتقاة

كلماته من قالمة معينة ، وأخيراً سرعته أكبر ما يمكن في قراءة نص منشور وهكذا إذا ظهرت بعض المحدودية في القراءة نسبياً سيكون عقلياً وليس ميكانيكياً .

كلمة في الثانية



الشكل ١٢ - ٤

يبدو حتى الآن أننا لن نستطيع تمييز الإنسان بسرعة معلوماتية معينة ، اذ بينما تزداد صعوبة مهمة معينة بزيادة محتواها المعلوماتي ، فإن هذه الصعوبة تتوقف ايضا على قابليات الإنسان في مجال معين . يتمتع الكائن الانساني بمرونة كبيرة في قابلياته ، الا أنه يتعرض لاجهادات قوية وببطء لدى تصديه للمشاكل الكبيرة وهو بصورة عامة بالغ الكفاءة في الحالات المتعددة الا انه بطيء السرعة بشكل عام .

تعتمد تنمية القابليات الانسانية في مجال معين على التجارب المدروسة .
المخططة بشكل جيد . تشبه هذه العملية ترميز الرسائل من مصدر
رسائل معين بهدف تحقيق اكبر سرعة بث للمعلومات عبر قناة ذات
ضجيج ، وقد سبق ان بحثنا ذلك في الفصل الثامن ، واسمينا السرعة
العظمى عندئذ بسعة القناة . لقد تم انشاء القائمة المنتجة من الكلمات
والتي تضمنت الكلمات الـ ٢٥٠٠ الاولى الاكثر شيوعاً والمؤلفة من مقطع
واحد ، عبر محاولة هادفة لتحقيق سرعة معلوماتية عالية لقراءة مجموعات
عشوائية من الكلمات بصوت مرتفع .

يجدر بنا ان نلاحظ ان انتقاء كلمات النصوص بشكل عشوائي مع
الآخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورودها الطبيعية يفضي الى سرعة
معلوماتية اكبر بقليل . هل من الممكن ان تكون كلمات لغة معينة وتواتر
ورودها قد وفقا على نحو ما مع القابليات الانسانية عبر عملية طويلة
من الاختيار اللاواعي التطور .

رأينا في الفصل الخامس ان احتمال ورود كلمة في النصوص الانكليزية
يتناسب مع تواترها ، اي ان الكلمة ذات الترتيب n في تواتر ورودها
اقل باحتمال ورودها بمئة مرة بالمقارنة مع الكلمة الاكثر شيوعاً . سبق
ان اوضح الشكل ٥ - ٢ هذه العلاقة التي اشار اليها للمرة الاولى جورج
كينزلي زيف وعزاها الى مبدأ الجهد الاقل .

ان قانون زيف لا يمكن ان يكون صحيحاً بشكله البسيط هذا فقد
مرفنا في الفصل الخامس الى ان حساب احتمال ورود الكلمات ما تقدم
لا يمكن ان يكون مطلق الصحة ، اذ لو تحقق ذلك لكان مجموع الاحتمالات
اكبر من الواحد . لقد جرت محاولة لتعديل واشتقاق وشرح قانون زيف
بشكله الاصلي والابسط على انه توصيف تقريبي للسلوك الانساني اثناء
"الغة" ، وقد توصل زيف الى هذا القانون بشكل تجريبي عبر اختبار
احصائيات النصوص الفعلية .

كما قدمنا ، ربط زيف قانونه ببدأ الجهد الاقل . لقد تركزت الجهود لربط الطاقة الموظفة او الثمن اللازم لانتاج النصوص مع عدد الاحرف في النصوص . يعتبر اللغويون ان اللغة هي اولا اللغة المنطوقة ، ويبدو من غير المحتمل ان تكون عادات القراءة والكتابة والنطق قد نشأت على هلمش عدد الاحرف اللازمة لتكوين الكلمات .

لاحظنا فعلا ان تجارب السرعة المعلوماتية التي اعتبرناها للتو تفضي الى حقيقة مفادها ان سرعة القراءة هي نفسها المقاطع الصينية والكلمات الانكليزية المقابلة المبينة من الاحرف الهجائية وربنا من خلال الشكل ١٢ - ٣ كيف يؤثر كون الكلمة اعتيادية او دارجة على سرعة القراءة مثلما يؤثر عدد المقاطع .

الا يمكننا اعتبار وقت القراءة كمقياس للجهد ؟ قد يحنج تفكيرنا مثلا الى الاعتقاد باننا نستطيع التعامل مع الكلمات الاكثر شيوعا بسهولة اكبر اي اننا نذكرها ونستخدمها بجهد او زمن ادنى بالمقارنة مع الكلمات الاقل شيوعا . ربما ان تنظيم الدماغ الانساني يقوم على نوعين من التخزين : الاول يهدف الى الاسترجاع السهل للكلمات ، بينما تستعد الكلمات في النوع الثاني بصرف جهود كبيرة ويتميز الاول بتفصيلته عددا قليلا من الكلمات وحسب . نميل منذ هذه المرحلة الى فكرة ان وقت القراءة هو مقياس لسهولة التناول ، او الثمن المطلوب .

لنتخيل اكثر من ذلك ، بان الكائنات الانسانية تستخدم اللغة بطريقة تسمح ببث المعلومات باكثر كمية ممكنة مقابل زمن معين ، فاذا اعتبرنا ان هذا الثمن هو زمن النطق ، نستنتج ان الانسان يسعى لنطق اكبر كمية ممكنة من الكلمات خلال زمن محدد .

يؤدي استخدام مبادئ رياضية بسيطة الى برهان علاقة تربط باعلى سرعة معلوماتية ممكنة ، اذ لتحقيق مثل هذه السرعة في حالة رسالة مكونة من كلمات مختارة بشكل عشوائي ، يجب ان يتم هذا الاختيار وفق احتمال قدره $1/26$ معطى بالعلاقة :

$$ح (ر) = \frac{٣}{٤} ث ز$$

حيث $ز$ هو زمن قراءة الكلمة ذات الترتيب $ر$ في قائمة الكلمات الأكثر شيوعا ، و $ث$ هو ثابت نختاره بشكل يصبح مجموعة الاحتمالات كلها مساويا للواحد . تقول هذه العلاقة ان الكلمات المرتبطة بوقت قراءة طويل ستستخدم بتواتر اقل من تلك ذات وقت القراءة القصير ، وهذه العلاقة صحيحة بقدر رغبتنا في الحصول على سرعة معلوماتية اعظمية .

اذا كان قانون زيفف صحيحا ، يجب ان يساوي الاحتمال ($ر$) حيث

$$\frac{١}{ر} = ح (ر)$$

١ هو ثابت آخر . ينتج من هاتين المساواتين ان :

$$\frac{١}{ر} = \frac{٣}{٤} ث ز$$

وبالعودة الى بعض الشروح في الملحق ، نصل من هذه العلاقة الى علاقة اخرى هي :

$$ز = ب + ح ل ع د$$

هنا ب ، ح ثابتان يحددان باختيار العلاقة بين زمن القراءة $ز$ و الترتيب وفق الاعتقاد ، اذ ان العلاقة الاخيرة يجب ان تكون صحيحة للقراءات التجريبية فيما اذا كان قانون زيفف صحيحا وكلفت السرعة المعلوماتية تصل حتى نهاية عظمى في حالة الانتقاء العشوائي والمستقل للكلمات وفق الاحتمال الوارد في قانون زيفف .

لا تنتقى الكلمات بشكل عشوائي ومستقل عند انشاء النصوص اللفظية الفعلية ، لذا لا نستطيع التأكيد بان الكلمات المنتقاة وفق قانون زيفف

مستصل بالسرعة المعلوماتية الى قيمة عظمى . الا انه من المفيد والمتبع ان نحاول معرفة مدى صحة التنبؤات القائمة على اساس الاختيار العشوائي والمستقل للكلمات ، خاصة في حالة قراءة النصوص اللغوية .

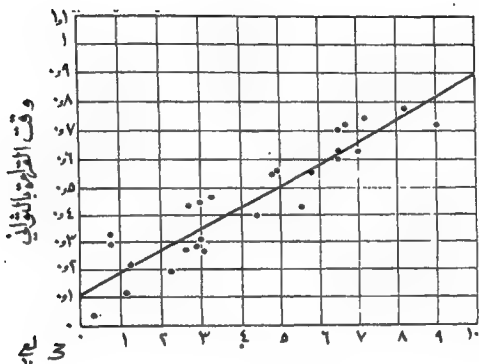
عالم الرياضيات بنويت ماند لبروت هذا الموضوع من خلال المعلومات الخاصة بوقت القراءة التي جمعها عالم النفس التجريبي د. هـ. هوز ، وقد عرف ماندلبروت باهتمامه في اللغويات . وقد حاولت بنفسى مقارنة العلاقة الاخيرة مع السلوك الانساني الفعلي بمساعدة المحرّب الخبير في مجال علم النفس الفيزيائي ر. و. ويزس .

هناك صعوبة حقيقية في اجراء مثل هذه المقارنة . يبدو واضحا ان سرعة القراءة تقيد بامكانية تمييز الكلمة وليس بنطقها ، اذ يمكن لانسان ما ان ينطق كلمة طويلة معروفة ، بينما يحدث في كلمة اخرى قصيرة وغير معروفة محاولا تمييزها . يمكن الالتفاف حول هذه الصعوبة باجراء عملية توسيط وذلك عبر قياس الزمن الكلي اللازم لنطق ثلاثة كلمات متتالية ومن ثم مقارنة هذا الزمن بالزمن المحسوب من العلاقة الاخيرة .

انجز ريزس هذا العمل ولخص نتائجه في الشكل ١٢ - ٥ . ينطوي الاختبار على محاولة الشخص القراءة باسرع ما يمكن . تمثل العلاقة الاخيرة خطا مستقيما ، اما النقاط التجريبية في الشكل ١٢ - ٥ فهي اكثر انتشارا من ان يجمعها خط مستقيم .

كان علينا ان نتوقع مثل هذا الانتشار اذ اتنا قمنا بعملية تجبير التواتر الطبيعي للكلمات في النصوص الفعلية الى خبرة الشخص الموضوع تحت الاختبار ، كما رأينا من الشكل ١٢ - ٣ امكانية تأثير طول الكلمة على سرعة القراءة ، وأخيرا فقد اعملنا تماما العلاقة بين الكلمات المتتالية .

يشير هذا النوع من التجارب الغضب فعلا ، اذ يمكن ان نستقرىء ما يمكن اجراؤه هذه التجارب ، الا ان كلا منها يحتاج لوقت طويل ، كما



الشكل ١٢ - ٥

أنا لا ندرى فيما إذا كانت ستتمخض عن نتائج ذات قيمة حدية . ربما أن عبقرياً ما سيكشف عن الحقيقة في أحد الأيام ، إلا أن عالم النفس المتحفظ يجنح لجعل عمله وأعداء بنتائج أكيدة لا جدل حولها .

يوحي العمل السابق ، على الأقل ، بأن الاقتصاد في الجهد يحكم استخدام الكلمة ، وأن الاقتصاد في الجهد يعني الاقتصاد في الوقت . أنا مأولنا في حيرة فيما إذا كان هذا ناتج القابليات المدربة للتلاؤم مع اللغة أو فيما إذا كانت اللغة نفسها تصبح أكثر تنافساً مع القابليات الفكرية لبني البشر . ما عساه يكون أمر عدد الكلمات التي نستخدمها ، مثلاً ؟

يقيس بعض الباحثين أحيانا المعجم اللغوي للكاتب بمجموع الكلمات المختلفة في أعماله ، والمعجم اللغوي بشكل اعم لاي انسان بمجموع الكلمات المختلفة التي يفهمها . الا ان الكلمات النادرة وغير العادية تشكل في حقيقة الامر نسبة ضئيلة من مفردات اللغة . يبرز عند هذه المرحلة السؤال التالي : وما هو عدد الكلمات التي تشكل معظم اللغة ؟

قد يذهب البعض للتأكد بان عدد الكلمات المستخدمة يعكس تعقيد الحياة ، فما نحتاجه من المفردات في مدينة كبيرة لا يفيدنا في قرية صغيرة ولكننا على كل حال نملك حرية الخيار بين استخدام كلمة جديدة للدلالة على شيء ما او جملة من كلمات شائعة للدلالة على نفس الشيء ، كان نقول مثلا التلفزيون او الجهاز الذي يرينا ما تبثه اجهزة اخرى بعيدة ، هنا كلمة التلفزيون الاولى تشير الى شيء معين ولها استخدام متخصص بينما الكلمات في المجلة الاخرى : الجهاز ، الذي ، يرينا ، ما ، تبثه ، اجهزة ، اخرى ، بعيدة ، فلها استخدامات اخرى ايضا .

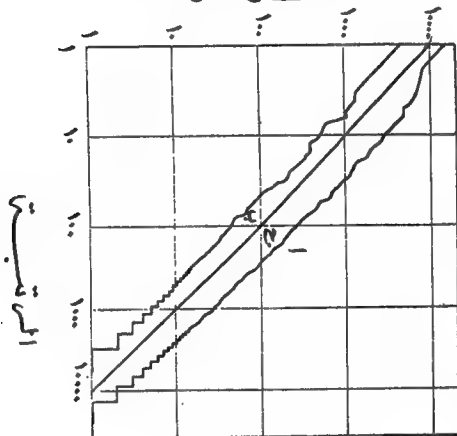
وهكذا نستطيع انشاء لغة اصطناعية بعدد اكبر لو اقل من الكلمات بالمقارنة مع اللغة الاصلية ونستطيع بواسطتها قول نفس ما نقوله باللغة الاصلية . يمكننا ان نذهب ابعد من ذلك اذا شئنا فنعتبر أبجدية اللغة كلفة مختزلة بعد ذاتها يمكننا ان نترجم اليها اي نص لغوي . .

ربما تجنح كل اللغات لامتلاك معجم اساسي تفرضه قابليات تنظيم الدماغ البشري باكثر مما يفرضه التعقيد الظاهري للمحيط . يضيف عادة التميزون والمبدعون من بني البشر الى هذه اللغة الاساسية عددا من الكلمات الخاصة وغير المتواترة بقدر ما يرغبون او يتذكرون .

درس زيف هذه القضية من خلال المخططات الموضحة لقانونه . يوضح الشكل ١٠٢ - ٦ علاقة تواتر الكلمة بدلالة درجة شيوعها اي كما اشرنا سابقا كم هي اعتيادية هذه الكلمة ورتبة امتيادها . يعطي الشكل ثلاثة حالات : الاولى فقرة من عمل اوليس لجيمس جويس ولعدد من

الكلمات مساو ل ٢٦.٤٣٠ كلمة ، والثانية ل ٣٩٨٩ كلمة مأخوذة من الصحف، حيث أشير للحالة الأولى بالحرف آ وللحالة الثانية بالحرف ب . أما الحالة الثالثة وهى الخط المستقيم ح فيمثل قانون زيبف النظري .

التواتر



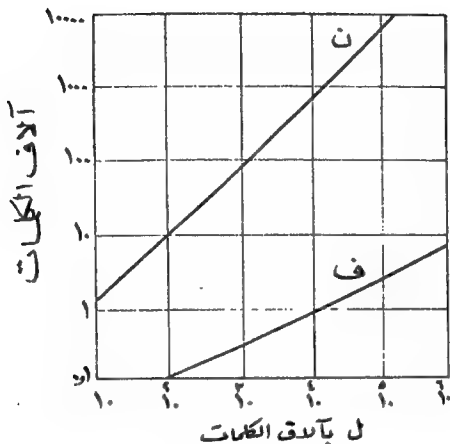
الشكل ١٢ - ٦

يحدد ارتفاعا آ و ب بعدد الكلمات في العينة ، في حين ان ميل المنحنيين ، وهو الشق الثاني المهم ، فيرتبط بطول العينة . أما القسم المتدرج في الزاوية اليمنى السفلى من المنحنيين فيعكس حقيقة ورود بعض الكلمات غير المتألفة مرة ربما أو مرتين أو أكثر ؛ ولكن ليس ٥٠ مرة أو ٢٠ مرة .

عندما نحاول توفيق كل من المنحنيين الى المستقيم ح المائل بزاوية ٥٤° ، نجد ان العوامل الهامة في الموضوع تعدى موضوع الميل . نبدأ قياس التواترات بالكلمات التي ترد مرة واحدة ، هنا تمثل الزاوية اليمنى السفلى تولد ورود مساوياً الواحد . كذلك يبدأ محور الرتب بالعدد ١ المقابل لأكثر الكلمات استعمالاً . وهكذا يبدأ كل من المحورين بالعدد ١ ثم يظهر كل منهما نفس التقسيمات ايضاً لتمثيل نفس الازديادات في الأعداد . يتضح من الشكل أن الخط الممثل لقانون زيف يعكس حقيقة مفادها أن عدد الكلمات المختلفة في العينة يجب أن يساوي عدد مرات ورود أكثر الكلمات استخداماً .

نذهب أبعد من ذلك فنقول : اذا كان قانون زيف صحيحاً في صيغته الأولية هذه فان نصف عدد الكلمات في العينة ستكون مساوية للجرل التربيعي لعدد الكلمات المختلفة في الفقرة المعنية . يعطي الشكل ١٢ - ٧ العلاقة بين عدد الكلمات المختلفة و عدد الكلمات ل في الفقرة المعنية ، وكذلك العلاقة بين ف عدد الكلمات المكونة لنصف الفقرة وعدد الكلمات فيها ل .

تنعكس هنا محدودية مفرطة في معجم المفردات ، اذ تشكل ١٧٠ كلمة نصف فقرة جويس ، كما يؤكد الشكل ١٢ - ٦ نفس الحقيقة بالنسبة للكتابات الصحفية . يؤكد زيف أن قانونه يصلح للغة الجرمانية القديمة اذا شمل تعداده كل ما يحتل موضع كلمة من النص ، وكذلك مختلف اللهجات الجرمانية ، وان ظهرت بعض الشذوذات في القسم اليساري الأعلى من الخط الممثل للقانون . تتجنب المنحنيات الممثلة للغة النروجية لأن تكون أكثر حدة في القسم الأيمن الأسفل بالمقارنة مع القسم الأيسر الأعلى ، كما تعطي لغات أخرى خطأ يساوي ميله ثلاثة أرباع خط زيف . يعني ذلك عدداً أكبر من الكلمات المختلفة في نص معين ، أي معجماً أكبر . أما في حالة اللغة الصينية ، فيرتفع المنحني فجأة في أعلى اليسار دلالاً على مفردات أكثر .



الشكل ١٢-٧

ومهما يكن من أمر ، تمكس هذه الدراسة التشابه بين مختلف اللغات ، إذ يتشابه توزيع واحتمال الكلمات أن لم يكن في كل اللغات ففي معظمها ، فربما توائم اللغات نفسها مع فإليات العقل الانساني وتنظيمه ومبناه ، ولربما أن كل انسان يلاحظ ويعبر عن نفس عدد التظاهرات في محيطه ، فلهسان للاسكيغو يستخدم مفردات مختلفة للتعبير عن أنواع متباينة من الثلج . على كل حال تشترك كل اللغات في سمة واحدة هي محاولة تصغير الجهد المبذول لتحقيق الاتصالات الانسانية . تؤكد هنا أن هذه النتيجة ليست نهائية بحال من الاحوال .

وجهت انتقادات حادة لعمل زيف . فانا مثلا اعتقد أن من المستحيل أن يلعب طول الفقرة ، وبصرف قانون النظر عن المؤلف ، العامل الرئيسي في تحديد عدد الكلمات المختلفة . طبعاً يثبت قانون زيف حقيقة هامة وهي أن تواتر ورود الكلمات لا يتغير بطول العينة . يذهب بعضهم الى التصور بأن صحة قانون زيف ، أكثر ما تظهر لعينات طولها بحدود ١٢٠٠٠ كلمة ، وأنه في عينات أصغر تواتر كلمات لا تزداد إلا مرة واحدة ، بينما في العينات الأكبر يتضائل عدد الكلمات وحيدة الورد . وهكذا يبدو من المعقول أن سبب تشابه معجمي جويس والصحف اليومية هو أن الصحف مؤلفة من قبل عدد كبير من الكتاب .

اقتصر تناولنا لقانون زيف حتى الآن على اعتباره ملائماً للمعلومات التجريبية بشكل تقريبي ومن ثم على التساؤل عما نستطيع فعله بعد ذلك . إلا أن هناك منظوراً آخر لهذا القانون ، إذ يمكن أن نبرهنه على ما هو عليه انطلاقاً من فرضيات بسيطة تتعلق بتوليد النصوص . لقد أعطى عدد من الباحثين مثل هذا البرهان وكان أهم ما قدم في هذا المجال هو عمل الرياضي ماندلبروت الذي اتينا على ذكره ، ويبدو أنه ذهب الى أبعد من حدود هذا البرهان أيضاً .

يمطي ماندلبروت اشتقاقين مختلفين . يفرض في الأول أن النص ينتج من سلسلة من الأحرف والفراغات المنتقة بشكل عشوائي وباحتمالات غير متساوية ، كما في التقريب الأول للنصوص اللغوية في الفصل الثالث . يسمح ذلك بعدد لا نهاية له من الكلمات المختلفة المؤلفة من سلاسل من الأحرف مفصولة عن بعضها بسلاسل من الفراغات .

يبين ماندلبروت ، استناداً لهذا الفرض فقط ، أن احتمال ورود هذه الكلمات ح (ر) يمكن حسابه من العلاقة :

$$ح (ر) = ك \times (ر + ف) - ب$$

حيث ر هو ترتيب الكلمة المعنية وفق تصنيف الكلمات بالدرجة ،
المعتادة أو الأكثر استخداماً ، أما ب ، ف فهما ثابتان يمكن حسابهما إذا
عرف احتمال كل كلمة وكل فراغ في النص . وأخيراً تحدد قيمة ث على
أساس جعل مجموع كل الاحتمالات مساوياً للواحد الصحيح .

نلاحظ هنا أنه إذا كان ف صغيراً و ب تقريباً واحد فإن العلاقة
الآخيرة تقترب من قانون زيبف . وبالمقارنة مع الخط المستقيم لقانون
زيبف فإن هذه العلاقة تمطي منحنيًا أكثر حدة في أعلى اليسار وأقل
انحداراً في أسفل اليمين . بقي أن نقول إن هذا المنحني يلائم معلومات
النصوص الفعلية أكثر مما يلائمها قانون زيبف .

لقد تم التأكيد على كل حال بأن طول الكلمات المنتجة بالعلبية
العشوائية الموصوفة لا تقابل طول الكلمات في النصوص اللغوية الفعلية .

ولا بد من الإشارة أيضاً إلى أن اللغات لها مظاهر غير عشوائية ، إذ
تقصر الكلمات كلما تواتر استخدامها . هل لنا الحق إذن بأن نتبنى صحة
قانون زيبف لمجرد أن الانشاء العشوائي للكلمات يقود إلى كلمات تحقق
هذا القانون . واقع الأمر أننا سنمتلك هذا الحق إذا توفر لنا ما يؤكد
بأن انتاج النصوص الفعلية يخضع لعشوائية مشابهة .

يفترض مالدبروت في اشتقاقه الثاني لقانون زيبف أن تواتر الكلمات
يجب أن يصل بالسرعة المعلوماتية إلى قيمة عظمى من أجل ثمن معين .
يعتبر كحالة بسيطة وخاصة أن لكل حرف ثمناً معيناً وأن ثمن الكلمة ،
أي ثمن سلسلة من الأحرف تنتهي بفراغ ، يساوي مجموع الثمن للأحرف
المكونة لها . تقود هذه الافتراضات مالدبروت إلى صيغة مماثلة لاشتقاقه
الأول وإن كان معنى الثوابت الواردة مختلفاً هذه المرة . فمثلاً يمكن أن
يكون الثابت ب أقل من الواحد إذا كان مجموع عدد الكلمات المسموح
بها نهائياً .

يمكننا استخدام العلاقة الأخيرة وتوحيدها بانسب شكل مع المعلومات التجريبية وذلك بأن نتوقف من البحث عن معانٍ ملائمة للثوابت الواردة فيها ، وإن نمطي تلك الثوابت قيماً تحقق هذا التوفيق التجريبي ، وهذا سيكون أجود على الصعيد الفعلي من محاولة الاقتراب من قانون زيف المقابل للقيم : $b = 1$ ، $f = 0$. يبقى على كل حال حتى هذا التطبيق موائماً لأكبر عدد ممكن من الحالات باستثناء عدد قليل منها . وفي بعض الاشتقاقات اللغوية المعاصرة تكون قيمة b الأقل من الواحد هي الأنسب .

يقول ماندلبروت أن غنى المعجم اللغوي يعكسه قيمة b ، فإذا كانت هذه القيمة أكبر من الواحد فإن عدد الكلمات المكررة ينخفض ، وإذا كانت قريبة من الواحد فإن تنوعاً كبيراً من الكلمات يظهر في مجال الاستخدام . ويضيف ماندلبروت أنه ينمو الطفل تتناقص قيمة b من ١٦٠٠ حتى ١٥٠٠ أو ربما حتى ١ وإذا كان الطفل هو جيمس جويس نفسه .

تؤكد ملائمة العلاقة الأخيرة للمعلومات التجريبية أكثر من قانون زيف ، وهي تتجاوز الاعتراض المنبثق عن قانون زيف بأن احتمال التمرير إنما يعتمد على طول العينة المجتزأة من النص . لا يعني ذلك بالطبع صحة اشتقاق ماندلبروت للعلاقة الأخيرة بشكل مطلق ، إذ من المحتمل أن تكون هناك علاقة رياضية أخرى أكثر تماشياً مع المعلومات التجريبية . ويحتاج الأمر إلى دراسة أعمق للحصول على أجوبة نهائية .

ينطبق قانون زيف على جمل معلوماتية غير تلك المتعلقة باستخدام الكلمات ، مثلاً في حالة عدد سكان مدينة معينة بالمقارنة مع حجم هذه المدينة . وهكذا نجد في المدينة العاشرة في الترتيب من حيث المساحة عشر عدد السكان الموجودين في أكبر مدينة ، وهكذا .

إلا أن هذا الانطباق قد لا يعمل كونه تصادفياً . يخضع مثلاً الجذب الثقالي بين جسمين لقانون عكس المربع ، وكذلك شدة إشعاع الشمس على

بمدين مختلفين منها ، الا انه لا يوجد قانون عام يمكن ان يفضي الى هاتين
الحالتين الخاصيتين في شروط معينة .

ان قابليتنا لاستقبال ومعالجة المعلومات محدودة اصلا بالامكانيات
المتواضعة لجملتنا العصبية . ويمثل هذه الحقيقة وقانون ٧ زائد او
ناقص ٢ لجورج . . ٢ . ميلز . يذهب هذا القانون الى انه بامكان
كل انسان بعد فترة قصيرة من الملاحظة ان يتذكر ويعيد اسماء عدد من
الاشياء المعتادة يساوي من ٥ الى ٩ من هذه الاشياء ، كالارقام العشرية
او الثنائية ، الاحرف ، او الكلمات الدارجة .

نعرض صورة ضوئية امام شخص لفترة قصيرة ، ثم نريه عدداً من
حبات الفاصولياء السوداء ، فيكون بمقدوره اعلامنا عدد العدد الصحيح
حتى ٩ حبات . وهكذا فبامكان ومضة واحدة نقل عدد من الامكانيات
مساو لمرة ، مثلاً من . وحتى ٩ ، والمعلومات المنقولة في هذه الحالة
لع ١٠ = ٢ر٣ بيت .

اما اذا عرض امام نفس الشخص عدد من الارقام الثنائية فسوف
يتذكر منها بشكل صحيح ما مجموعه ٧ ارقام ، اي انه تم نقل كم
معلوماتي مساو لـ ٧ بيت .

ولذا كانت الملاءمة المعروضة املحه هي الاحرف الابجدية ، فسيستفيد
منها اربعة او خمسة ، ان اي الكم المعلوماتي في هذه الحالة سيسلوي
٥ x لع ٢٦ = ٢٣ بيت .

يمكن لنفس الشخص ان يتذكر ثلاثة او اربعة كلمات قصيرة دارجة
اي اقل بقليل من ٧ - ٢ = ٥ اذا اختيرت هذه الكلمات من اصل الـ
٥٠٠ كلمة الاكثر شيوعا ، فتكون كمية المعلومات : ٣ x لع ٥٠٠ = ٢٧
بيت .

وكما في حالة التجارب على سرعة القراءة فإن الربح المترتب على التقيد الأكبر يتجاوز الضياع الناجم عن الفقرات الأقل ، حيث تزداد المعلومات بازدياد التقيد .

وهكذا تفضي تجارب سرعة القراءة وقانون ميلر الى نتائج مريكة .
إذا كان الانسان يتلقى ٢٧ بيت من المعلومات من صورة معينة ، فهل نستطيع بالمقابل بث صورة باستخدام ٢٧ بيت من المعلومات بحيث أن اسقاط تلك الصورة على الشاشة سيظهرها كصورة فعلية معتادة وإذا كان بمقدور الانسان بث ٤ بيت من المعلومات في الثانية كما تؤكد ذلك تجارب سرعة القراءة فهل نتمكن من ارسال صورة تلفزيونية أو صوت بجودة عالية وباستخدام ٤ بيت من المعلومات في الثانية .

اعتقد أن الإجابة في كلا الحالتين هي النفي . ما هو الخطأ إذن ؟
يمكن الخطأ في أننا قسنا ما يخرج عن الانسان لا ما يدخل اليه . ربما أن بإمكان الانسان ملاحظة ٤ بيت من المعلومات الهامة في الثانية إلا أن لديه الخيار الكامل فيما سيلاحظه . فمثلاً يمكن أن يتابع فتاة معينة أو يكتفي بالنظر الى ملابسها ، وربما يلاحظ ما هو أكثر من ذلك إلا أن هذه الملاحظة سرعان ما تتبدد قبل أن يصيغها في توصيف معين .

درس عالم النفس أي . آفريك وج . سيرلنغ هذه المشكلة بشكل مشابه ، فقد اسقط كل منهما عدداً كبيراً من الأحرف على شاشة (١٦ أو ١٨ حرف) ، وبعد أقل من ثانية نبها الشخص المختبر بإشارة معينة عن الحرف الذي يجب أن يذكره . إذا استطاع ذلك فلا شك أن كل الأحرف قد انطبعت في داخله لأن الحرف المعني قد انتقي بشكل عشوائي .

تؤكد نتائج هذه التجارب أن ما تخزنه العضوية من المعلومات في جزء من الثانية يتجاوز ٧ + ٢ أو ٧ - ٢ كما ورد في قانون ميلر ، ويبدو أن ٧ + ٢ أو ٧ - ٢ من هذه المعلومات تتحرك الى مخزن دائم مسن

الذاكرة بسرعة بند معلوماتي واحد في كل جزء من مائة جزء من الثانية ،
أو ما يساوي اقل من عشر النانية لكل البتود . تستطيع الذاكرة الاخرة
هذه تخزين المعلومات لعدد من الثواني . يبدو ان حجم هذه الذاكرة
هو المسؤول عن قانون ال ٧ - ٢ او ٧ - ٢ لميلر .

ان بإمكاننا البحث عن علاقات جديدة بين نظرية المعلومات وعلم
النفس بشكل مستمر . وقد اخترت من هذا المحيط الواسع بعض
النقاط القليلة وحسب . وسيبقى السؤال قائماً : هل حقاً ان نظرية
المعلومات هامة بهذا القدر بالنسبة لعلم النفس ، او ان هذه النظرية
تقتصر على تنظيم الممكن ، من حيث المبدأ ، باستخدام واسطة اخرى
غير نظرية المعلومات . اعتقد شخصياً ان نظرية المعلومات قد زودت علماء
النفس بمنظور جديد عن عملية الاتصالات ومن مدى تعقيدها وأهميتها
كما ان هذه النظرية قد حركت علماء النفس ودفعتهم لاعادة تقييم المعلومات
القديمة والبحث من معلومات جديدة . ويبدو لي اضافة لذلك انه بينما
تلعب نظرية الاتصالات الدور الرئيسي في الاتصالات الكهربائية ، تقتصر
مجال علم النفس على دور جلد وحسب . وأخيراً تضيف هذه النظرية
عبارات جديدة ومبهرة في مجالات متعددة .



الفصل الثالث عشر

نظرية المعلومات والفن

عندما زار موسيقي معاصرو استلا الموسيقى منذ عدة سنوات مختبرات بيل ، دهش لسماعه ان كل الاصوات الموسيقية وكل التراكيب الموسيقية يمكن اختزانها الى سلاسل عددية . اما بالنسبة لعلماء الاتصالات فلم يكن هذا الا من سقط الناع ، اذ ان استخدام تعديل ترميز النبضات يمكن من تمثيل أي موجة كهربائية او صوتية بسلسلة من عينات من السعة .

يبدو ان علماء الاتصالات قد تنبهوا الى بعض النقاط التي لم تكن لتهم الموسيقي . يلزم للتمثيل الجيد للموسيقى ذات عرض الحزام ١٥,٠٠٠ هـ.فث. استخدام ٣,٠٠٠ عينة في كل ثانية لا تقل دقة كل منها عن ١٠٠٠ ، وهذا ممكن اذا وظفنا ثلاثة ارقام عشرية او عشرة ارقام ثنائية لتوصيف سعة كل عينة .

يستطيع المؤلف ممارسة حرية الاختيار بين الاصوات بشكل مطلق اذا هو اعتبر ٢٠,٠٠٠ عدد عشري مكون كل منها من ثلاثة ارقام في كل ثانية . سيسمح له ذلك بالانتقل بين المؤلفات البالغ طولها حوالي عشرين دقيقة والتي يمكن كتابتها على شكل واحد متنوع بعدد من الاصفار مساو لـ ١٠.٨ مليون صفر ، وهو عدد كبير للغاية . بكلمة اوضح يستطيع المؤلف ممارسة اختيار مكافئ لـ ٣,٠٠٠,٠٠٠ بيت في الثانية .

نحسب هنا بعض الخطأ . فقد سبق وعرضنا الى أن الكائن الانساني لا يستطيع تجاوز سرعة معلوماتية قدرها ٤٠ بيت في الثانية مهما اتبع من اساليب كمحاولته القراءة بصوت مرتفع . هذه السرعة اقل بكثير من السرعة التي منحناها للمؤلف الموسيقى .

واكثر من ذلك ، فليس بمقدور الانسان أن يتلقى ويقيم من المعلومات ما يتجاوز ٤٠ بيت في اثنائية ، فعندما نصغي لمثل معين نسمع غامضاً من الكلام بسرعة متوسطة .

اشرنا الى الحرية والرونة التي يمتلكها المؤلف في التعبير عن مؤلفه كسلسلة من العينات ، ونضيف أن مثل هذه الحرية تهدر على نطاق واسع ، إذ أن مثل هذه الحرية والرونة تمكنان المؤلف من انتاج مجموعة من المؤلفات تبدو للمستمع غير مهمة وغير محبة . ان الضجيج الفاوسي الابيض المحتوي كل التواترات على قدم المساواة هو من وجهة نظر رياضية محصلة التنوع وعدم التوقع . ان اكثر الاصوات اصالة هي اقلها توقعا . الا ان الضجيج الفاوسي الابيض بكل اشكاله له نفس الواقع على الكائن الانساني ، إذ تختفي خصائصه من احاسيس الانسان الذي يحكم ان ما يسمعه ذي وتيرة واحدة وبلهت .

إذا كان حكم الانسان على ما هو شديدة التنوع وقليل التوقع من وجهة النظر الرياضية يتلخص بكونه على وتيرة واحدة ، اذن فما هو الشيء الذي سيجده مستحدثاً وممتعاً . اذا كان الشيء جديداً فيجب أن يكون قابلاً للتمييز عما هو قديم ، وإذا كانت الاصوات قابلة للتمييز ، فيجب أن تكون مألوفة الى حد ما .

نستطيع ان نجد في اصدقائنا المقربين ما هو مميز في كل منهم بينما لا يكون وضع الغرباء مشابهاً . يمكننا ان نميز بين الصيني والافريقي بالطبع ، الا أننا سنجد صعوبة بالغة في التمييز بين الصينيين أنفسهم ، وب نفس الطريقة نميز بين الضجيج 'الفاوسي' والموسيقى الرومانسية ، الا ان هذا لا يمنحنا قاعدة واسعة للتنوع ، فكل الضجيج الفاوسي يبدو متماثلاً بالنسبة اليها .

تبدو معظم المؤلفات الموسيقية للقرن الثامن عشر متماثلة بالنسبة لعشاق المؤلفين الرومانسيين ، وكذلك يبدو بالنسبة اليهم مؤلف اخوارد غريغ المسمى : مقطوعة هولبيرغ مماثلاً لموسيقى القرن الثامن عشر وان كان في واقع الامر مشابهاً لها بشكل ظاهري فقط . تبدو موسيقى الكورال من القرن السادس عشر رتيبة وغير مميزة حتى بالنسبة لعشاق القرن الثامن عشر . اعلم ان هذه القاعدة تعمل بشكل معاكس ايضاً اذ ان بعض انصار موتزارت يجدون فردي مما بينما يجد المتحمسون لتنوع الموسيقى عند فردي مجرد صخب وشجيج في الموسيقى المعاصرة .

يرغب المؤلف بان يكون حراً واصيلاً ، الا انه يرغب ايضاً بان يكون معروفاً . اذا لم يستطع متذوقوه التمييز بين اعماله فلن يقبلوا على شراء تلك الاعمال ، واكثر من ذلك إذا لم يستطيعوا تمييز اعماله من جملة اعمال المؤلفين آخرين ، فيكتفوا عند ذلك بتسجيل واحد كممثل للمجموع .

كيف يستطيع المؤلف اذن جعل مؤلفاته مميزة بالنسبة الى الجمهور؟ ربما بالحفاظ على سرعتها المعلوماتية والانتروبي الخاصة بها ضمن حدود القابليات الانسانية للتمييز . يمكن للمؤلف المذكور تحقيق هدف التمييز ايضاً بتنويعه للانتاج ضمن سرع تكافئ عدد من وحدات البيت في الثانية ، وبذا يتمكن الآخرون من ملاحظة الاختلاف بين اعماله .

هل يعني ذلك ان بإمكان المؤلف الحاسب ، اي نظري المعلومات والمؤلف في نفس الوقت ، انتاج متتالية بسيطة وبطيئة من النوتات الموسيقية المنتقة بشكل عشوائي . كلا بالطبع ، تماماً كما هي حال الكاتب اذا انتقى سلاسل من الاحرف بشكل عشوائي . ان ما سيفعله المؤلف الموسيقي هو اشادة عمله على وحدات اكبر مألوفة بالنسبة للجمهور من خلال الخبرة المتكونة عبر الاستماع الى المؤلفين الآخرين . وستكون هذه الوحدات مرتبة بشكل يمكن المستمع الى حله ما من توقع اللحن التالي دون وضعه خارج المسار طول الوقت . ربما ان المؤلف

سيحاول مفاجئة المستمع بين حين وآخر ، إلا أنه لن يفعل ذلك على الدوام ، كما أن المؤلف سينجح الى تقديم ما هو جديد ولكن بمعدلات ضئيلة ، وسيمعمل على تعويد المستمع على هذا الجديد ومن ثم تكراره بعد فترة في نوب مغاير .

يستخدم المؤلف الموسيقى لغة يعرفها المستمع ، تماما كما هي الحالة في اللغة العادية . اذ ينشأ سلاسل مرتبة من الكلمات الموسيقية وفق قواعد موسيقية اعرابية دقيقة . يمكن أن تكون هذه الكلمات انغام متألقة او مدرجة ، او لحن رئيسي او تزييني . وسوف تتالي في جمل مكررة بشكل نسيق تنطق بها آلات الاوركسترا . اذا كان المؤلف حلاقا فسينجح في نقل مشاعره الشخصية المميزة الى المستمع الراهف . واذا كان في الحد الأدنى حرفيا فسيأتي مؤلفه معتدلا ومقبولا .

لم نأت بجديد حتى الآن ، اذ أن بإمكان حتى أولئك البعيدين عن نظرية المعلومات اعادة ما قلناه في جمل مختلفة . إلا أنه يبدو لي على كل حال أن هذه الحقائق ستكون أكثر أهمية عندما يواجه المؤلفون الموسيقيون وغيرهم من الفنانين التنوع الهائل في المصادر التكنيكية المثيرة والمخيفة نوعا ما .

سينزعون للوهلة الأولى الى الاختيار الحر المستند الى قاعدة عرضية . لقد دهش م . ف . ماثيوز من مختبرات بيل لقراءة قدرة الكمبيوتر على خلق أي تشكيل موجي استجابة لبعض التعليمات المفداة اليه ، لذا عمد الى تصميم برنامج يميز كل نوتة موسيقية على بطاقة معينة وفق شكل موجتها ، زمنها ، خطوتها ، وعلوها . انتقل ماثيوز مدفوعا بفرح غامر الى مطالبة الكمبيوتر بقتاج مقاطع وسيقية لم تعرف وكان ذلك ، ومع أن المقاطع المنتجة كانت بسيطة إلا أنها كانت فوضوية .

يستطيع المؤلفون الكبار من امثال فلوريسيه تحريك المشاعر بشكل ونمط معين وذلك عن طريق مزج كل أنواع الاصوات المسجلة والمعدلة

وفق المدرسة الواقعية في الموسيقى . لقد انتجت عدة أعمال موسيقية باستخدام الامكانيات الالكترونية : الا ان المؤلفين ملأوا بمقون من صويوت كبيرة عند تخليهم من المصادر التقليدية .

اذا رغب المؤلف بالحفاظ على جمهوره فما عليه الا تبسيط مؤلفاته وكتابتها بالطرق التقليدية ، كما ان بإمكانه وغيره من المؤلفين تربية وثقيف الجمهور بحيث يصبح من الممكن تذكروتميز المصادر الجديدة لامعالم ، او ان على المؤلف مواجهة خيل آخر ببقائه مضمورا وانتظار الاجيال القادمة بهدف اصدار حكم عادل عليه . على كل حال ببقى هناك خيلرات اخرى خاصة اذا كان المؤلف عبقريا .

هل لدى نظرية المعلومات ما يمكن ان يمنحه الى الفنون ؟ اعتقد ان ليس لديها الا القليل مما هو مهم فعلا لمرضه باستثناء وجهة نظر وهي وجهة نظر مهمة سنخصص لها ما ببقى من هذا الفصل .

تناولنا اللغة في الفصل الثالث والرابع والثاني عشر . تتألف اللغة من ابجدية او معجم من الكلمات اضافة لاحكام او قيود قواعدية تتعلق بكيفية استخدام الكلمات وربطها ببعضها . فقد تطلنا التمييز بين مظاهر النصوص المتنوعة التي تفرغها القواعد والمعاجم اللغوية وطرقنا كذلك الى الحرية الفعلية التي يمارسها الكاتب او الناطق . وتاكدا ان منصر الخيار هذا هو المسؤول الوحيد من القيمة المتوسطة للمعلومات في كل كلمة . وبينما كيف توصل شاقون الى حساب هذه القيمة بما يتراوح بين ٣٣ الى ٧٢ بيت لكل كلمة . يشكل هذا الخيار ايضا القاعدة الصلبة التي يتمكن الكاتب او الناطق بالاستناد اليها من نقل الافكار والمعاني التي يرغبها .

تتسم المعاجم اللغوية بكونها واسعة ، على الرغم مما سبق وبوضوحناه في الفصل الثاني عشر من ان عدد قليل من الكلمات فقط يشكل الجزء الاكبر من اي نص . اما القواعد اللغوية فهي من الصعوبة بمكان لدرجة انها لم تصغ بشكل كامل حتى الان . ومع ذلك ، يمتلك الكثيرون معاجم لغوية واسعة ويحيطون بالقواعد بشكل يمكنهم من الانشاء اللغوي المتميز .

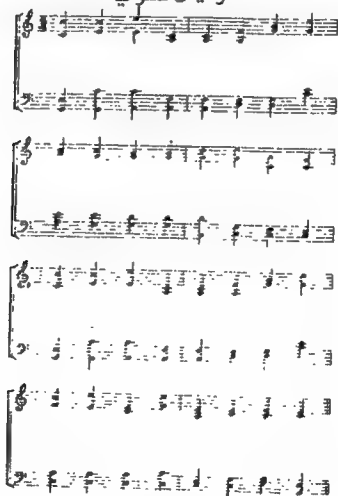
نجد من المقول أن نفرض وبشكل مماثل معرفة واسعة بالانصاصر الموسيقية من قبل من يصفون للموسيقى في تأمل وتذوق عالين . لا يعني ذلك أن نطالب مثل هذا المستمع بصياغة القواعد الموسيقية ، مثلما نهجم عن مطالبة الكاتب ببناء احكام القواعد اللغوية ، وكذلك ليس من الضروري أن يؤلف للموسيقى وفق القواعد بأكثر مما قد يطلب من أبكم يفهم ما يسمع في مجال النطق . ومهما يكن من امر فسيبقى لديه حد أدنى من المعارف الموسيقية يستطيع بواسطتها فهم ما يسمع .

كان هذا هو ما أردته عندما اشرت الى معرفة لغة الموسيقى او أسلوب الموسيقى ، أي على وجه التحديد معرفة عناصر واحكام الموسيقى لامة او فترة محددة ، او مدرسة موسيقية معينة . وسواء اذا كانت الاحكام الموسيقية مستندة أو غير مستندة الى قوانين الفيزياء فإن الالام بها يحتاج الى سنوات طويلة من التدريب اللغوي كما هو الامر في حالة اللغة المنطوقة . ان المامنا هذا هو الوحيد الكفيل بتعمير أسلوب وخصوصية عمل معين سواء كان ادبيا أو موسيقيا . تبدو الاصوات الموسيقية للأذن غير المدربة وكأنها منتقاة من عدد لا نهاية له من الاصوات الممكنة وليس فقط من قطاع محدد من الاصوات المعروفة ، وكذلك ستبدو لنفس الأذن القواعد الموسيقية ممثلة للخيار والتنوع . وهكذا سيهزم التعقيد الموسيقي الجمهور غير المدرب أو الجمهور الذي تعود لغة موسيقية مخالفة .

يجب ان نذكر ان بإمكاننا كتابة جمل ذات معنى حتى لو خالفنا القواعد اللغوية . يشبه وضع الموسيقى ذلك إذ ان بإمكاننا تقدير موسيقى غريبة نوعا ما بالنسبة لخبرائنا . وبالتلّيل يمكننا كتابة جمل صحيحة من حيث القواعد إلا أنها لا تحمل بين ثنائياتها أي معنى محدد ، ساقف عند هذه الامكانية الأخيرة للحظة . علينا أولا أن نلاحظ أنه في نفس الوقت الذي يمكننا فيه كتابة جمل ذات معنى وصحيحة وفق قواعد الاعراب ، إلا ان ذلك غالبا ما يعرضنا لتحديق الآخرين في نقص كفاءتنا كوننا كنا واضحين في التعبير .

لن يكون جديداً اذا استغنينا عن المعنى بشكل كامل مع ابقاء معجم معقول وبعض او كل القواعد . وهكذا زود موتزارت الاجيال بفواصل موسيقية في $\frac{3}{4}$ الزمن اضافة لمجموعة من القواعد . اذا عمدنا الى قذف النرد للحصول على سلسلة من الارقام العشوائية وانتقاء الفواصل وفق القواعد فاننا سنستطيع تأليف عدد لا نهاية له من مقطوعات الفالس حتى لو افترنا الى الخبرة في التأليف الموسيقي ، وستبدو مؤلفاتنا شبيهة بموتزارت غير منظم . يعطى الشكل ١٢ - ١ مثالا في هذا العرض .

موسيقى عشوائية



الشكل ١٢ - ١

يقال أن بعض المؤلفين الكبار قلعوا بتأليف موسيقى غير منظمة من هذا الطراز ، ومنهم جوزيف هايدن ، ماكسيميليان ستارلر ، وباخ . استخدم جون كيج وهو مؤلف متأخر العمليات العشوائية لانتقاء سلاسل من النوتات الموسيقية .

قمت أنا وزوجة كلود شانون عام ١٩٤٩ ، ودون أن ندرى بالأعمال العشوائية المشار إليها بتأليف موسيقى ابتدائية احصائية او عشوائية . نظرنا أولا 'جدولا' بالانعام المسموحة في المقامات ١ - ٤ من مفتاح سي . لقد تضمن الجدول في الحقيقة انعام المقام ١ فقط إذ استخرجت الانعام الباقية من هذه وفق قواعد محددة . تم انجاز عدد من المؤلفات باستخدام جدولول للاعداد العشوائية وقذف ثلاثة احجار نرد صنعت خصيصا .

كانت القاعدة الوحيدة المستخدمة في هذه المؤلفات لربط الانعام مع بعضها ، هي قاعدة ربط التضمن اذا كان لهما نفس اللون في نفس الطبقة . لقد جعل هذا الشرط بقية الانعام تقفز هنا وهناك بشكل غير مرضٍ . يقابل ذلك استخدام الاحتمالات البسيطة وغير الصحيحة في انشاء النصوص كما سبق والمعنا في الفصل الثالث .

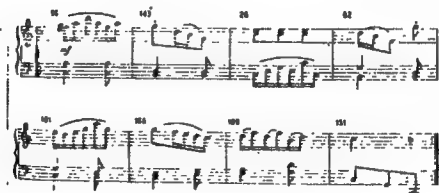
وعلى الرغم من التشكيل القصير المدى لهذه المؤلفات البدائية فقد حاولنا ان نجعلها معقولة ومقبولة وقابلة للتذكر ، بل وذات مدى بعيد .

وهكذا فقد تكون كل مؤلف من ثمانية درجات بمقياس $\frac{4}{4}$ ،

وتم التوصل الى المدى البعيد بجعل الدرجة ٥ مكرر الدرجة ١ والدرجة ٦ مكرر الدرجة ٢ ، بينما اختلف المرحان ٣ و ٤ عن المرحان ٧ و ٩ .
اذن فالمؤلفات كانت من نوع الروندو الابتدائي . كما تم تصنيف الانعام ١ ، ١٦ ، ٢٢ في المقام الاول بينما الانعام ١٥ ، ٢١ اما في المقام الرابعع او الخامس . وذلك بهدف اظهار اثر ايقامي .

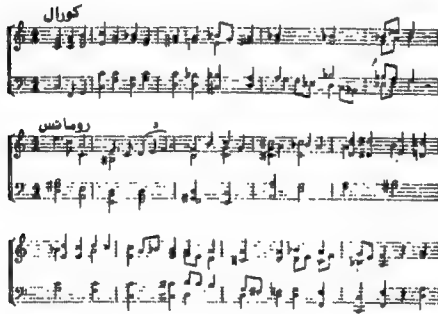
لقد شابهت مؤلفاتنا التراتيل ، على الرغم من انها روندو اصولية .
 بين الشكل ١٢ - ٢ أحد هذه المؤلفات ، وقد ذهبنا ابعد من ذلك
 بتحديد كلمات لهذه التراتيل ، وكل المؤلفات الاخرى تشبه ذلك الموضع
 في الشكل ١٢ - ٢ وهي بالطبع من تأليف نفس الملحن ، الا انها بعد
 عدد من مرات الاستماع تبدو مختلفة . ومن الطريف حقاً انني بدأت
 اتملق بهذه الموسيقى بعد سماعي اياها لمرات كثيرة . ولاشك انها ستقع
 بشدة على اذني موسيقي مرفه .

قام دافيد سليبيان ، وهو عالم معلومات سبق أن ذكرناه ، بعمل
 آخر عام ١٩٥١ . فقد استخدم ، باقتراع شلتون ، المعلومات الاحصائية
 عن الموسيقى المتوفرة لدى علماء الرياضيات الذين يفتقرون للخلفية
 الموسيقية . عرض على الشخص المختبر ربع علامة ، نصف علامة ، او
 ثلاثة اقسام العلامة من مؤلف موسيقي وطلب منه اضافة نصف علامة
 معقولة ، ثم ابرز المحصلة الى شخص آخر طالباً منه اضافة نصف علامة
 اخرى وهكذا . وسبق أن اخبر هؤلاء الاشخاص بطابع المؤلفات الموسيقية
 المعنية .



الشكل ١٢ - ٢

قدمت في الشكل ١٣ - ٢ نموذجين ، الاول موسيقى كورالية بنيت على اساس اضافة نصف علامة استنادا لنصف العلامة السابقة ، والثاني موسيقى رومانسية انشأت باضافة نصف علامة بالاعتماد على الانصاف الثلاثة السابقة . اعجب في الواقع وبشدة كيف ان هذين المؤلفين يظهران كما هما عليه رغم عدم الانسجام والتوافق بين الانغام المتتالية فيهما . ان طابع الموسيقى في هذين العملين ملفت النظر ايضا ، فعلى ما يظهر كان لدى الرياضيين افكار قليلة عما يناسب الموسيقى الرومانسية وما يناسب موسيقى الكورال .



الشكل ١٣ - ٢

توضح تجارب سليبيان مرونة الكائن الانساني واخطأه . صحيح ان العمليات العشوائية تبدو متسقة الا انها باهتة وعديمة الروح ، وقد استخدم بعضها في التأليف الموسيقي .

الا انه ليس من شك في فمرة الكمبيوتر على انتاج موسيقى عشوائية تشبه موسيقى مؤلف معين اذا غذي منذ البداية ببعض الاحصائيات المميزة لطابع هذا المؤلف يوضح هذه الامكانية طابع موسيقى الحفانة المبكر من قبل بينكروتون وتنسوع الطوايع المستحضر من قبل هيلر وايزاكسون والتي ساعرض لها فيما يلي .

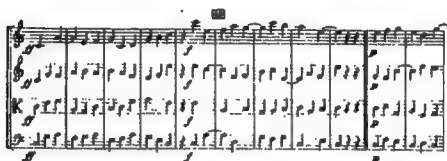
نشر ريتشارد . س . بينكروتون عام ١٩٥٦ في مجلة العلم الامريكي بعض القواعد البسيطة لكتابة الالحن . اوضح بينكروتون كيفية اختيار علامة موسيقية على اساس احتمال ورودها بعد علامة معينة ، ومدى تغير هذه الاحتمالات بتغير الموقع في المدرج الموسيقي . كما حسب الانتروبي لكل علامة باستخدام الاحتمالات المستخرجة من طابع موسيقى الحفانة ووجدها مساوية لـ ٢.٨ بيت ، واعتقد شخصياً ان هذا الرقم اكبر مما يجب . اعتبر بينكروتون آلة متناهية الحالات بامكانها انتاج الالحن العادية . كما فعلت نفس الآلة في الشكل ٢ - ١ عندما انشأت المجلمل اللغوية .

استند كل من بروكس ، هوبكنز ، نويمن ، ورايت الى موسيقى التريابل ونشروا بحثاً عام ١٩٥٧ حول الجاقب الاحصائي للتاليف الموسيقي .

اعلنت مؤسسة بوروز عام ١٩٥٦ انها عهدت للكمبيوتر بتاليف الموسيقى ، كما اعلن عام ١٩٥٧ أن الدكتور بوليشو والدكتور كلاين استخدموا كمبيوتراً كبيراً لتاليف الالحن الموسيقية . وقد ألف جاك . اويتز كلمات لاحد هذه الالحن واذيعت من التلفزيون الامريكي فعلاً . وقد حدا الكثيرون هذا الحدو في التاليف الموسيقي .

ومهما يكن من امر فان التاليف الموسيقي الجدي بواسطة الكمبيوتر لم يشاهد النور الا على يد هيلر وايزاكسون من جامعة النوي ، فقد نجح هذان العالمان في صياغة قواعد النوعيات الاولى من اربعة اقسام والتي مكنت الكمبيوتر من اختيار النوتات الموسيقية بشكل عشوائي الا اذا خالفت القواعد حيث كان الكمبيوتر يرفضها .

اقتصرت القواعد على العلاقات المباشرة بين ثلاثة نوتات متتالية باستثناء الإيقاع الختامي ، لذا تراوحت الموسيقى عبر مجالات واسعة، وإن كانت جيدة ضمن مجالات ضيقة ، لا بل كانت مذهشة أحيانا في تلك المجالات . يوضح للشكل ١٢ - ٤) نموذجاً من هذه الموسيقى .



الشكل ١٢ - ٤

ذهب هيلر وإيزاكسون أبعد من ذلك في محاولتهما إثبات قدرتهما على جعل الكمبيوتر يولف ألحانا ديناميكية ومتناغمة وكذلك على تحقيق التأليف الموسيقي وفق سلاسل ماركوف ، حيث يتم الاختيار المتتالي للنوتات الموسيقية استناداً لتتابع احتمالية محسوبة بدورها من جداول منظمة وفقاً لاعتبارات التنافس الموسيقي . أنتج الممثلان بذلك خواصم موسيقية جيدة .

لقد جمع هذا العمل الموسيقي وبيع تحت اسم مقطوعة إريك لودمي وتري ، وكما أوضحنا فلهذا العمل خصائص متميزة في مقاطعة المحطة إلا أنه ضئيف وشديد التراوح إذا أخذ ككل . ولو فرض على العمل نموذج معين لو كررت فيه بعض المقاطع لتحسن بشكل ملحوظ . إن لهذا طابعا تقريرياً حاسماً تماماً في التكرارات في موسيقى الروندو ، أو كما هو الأمر في قواعد شومسكي التي شرحناها في الفصل الرابع . يجب أن نتوقع على كل حال استحالة تأليف موسيقى ذي مدى واسع بمجرد استخدام النوتة السابقة أو ربما عدة نوتات سابقة في حساب احتمال النوتة التالية ، فالعلاقة المطلوبة يجب أن تربط أجزاء العمل وليس النوتات المفردة .

يؤكد عمل هيلر وإيركسون أن بإمكان الكمبيوتر تأليف بعض الأعمال الموسيقية التي كانت مقصورة على الإنسان فيما مضى . أضف إلى أن بعض المؤلفين غير المهووبين قد يلجأون للكمبيوتر لدى كتابتهم لأعمالهم الموسيقية ، وما يفعله أحدهم هنا هو توجيه التأليف العام وترك مهمة ملء التفاصيل للكمبيوتر . كما أنه يمكن استخدام الكمبيوتر لتجريب قواعد جديدة للتأليف قد يصعب على المؤلف للوحة الأولى تجربتها والاعتماد عليها .

نسمع في هذه الأيام أن علم السيبرنيتيك سيتحفظنا بالآلات يمكنها أن تتعلم . إذا كان بإمكان هذه الآلات أن تتعلم بأسلوب صعب بكل ما تعنيه هذه الكلمة ، فلماذا لا تتعلم ما نرغب منها أن تتعلمه حتى عندما نكون عاجزين من معرفة أنفسنا . وهكذا إذا فرغنا على الكمبيوتر نظام مكافآت وعقوبات بما لنجاح مخايلاته أو فشلها ، نستطيع إذ ذاك وضعه في شروط تمكنه من إنتاج موسيقى إسبانية أو كلاسيكية وفق هوانا . لا شك أن هذه الأفكار مثيرة للغباء ، وقد تبدو عديمة المعنى في عصرنا وربما ستبقى كذلك لمدة مثناة قادمة من السنين .

ليست الموسيقى هي كل الفن ، وإن كنت قد بدأت بها فلأنها تعرض بشكل غير عادي بعض الأفكار المشتقة من نظرية المعلومات ، علماً بأن

المروء على هذه الافكار كان من الممكن انجازها باستخدام اللغة ، وقد كان للتجارب المشوالية مع اللغة شأن كبير في تعزيز بعض الاستنتاجات المتعلقة بنظرية المعلومات .

قام بروفيسور من الاكاديمية الكبيرة لاغودا باطلاع الكاتبتن لومويل غوليفر على اطار من الكلمات مؤلف من مجموعات من الاحرف مرصوفة بشكل معين . عمد البروفيسور بعد ذلك لخلط هذه الاحرف وانصرف الى تأمل الحكمة الكامنة وراء تشكيلات الكلمات الجديدة .

عرضنا هنا التطبيق الخاطئ للعمليات المشوالية في توليد النصوص ، اذ لن يزيد هذا معلوماتنا بأي قدر ، فمن ذا الذي سيأخذ العمليات المشوالية غير الموثوقة على محمل الجد . واقع الامر انه يوجد عدد كبير من الممارات غير الاساسية ، وما نحتاج معرفته هنا هو : ما هو كذلك وما هو ليس كذلك .

تفسي العمليات المشوالية ، رغم ذلك ، الى نتائج مشيرة ، ففي الفصل الثالث عرضنا التقريبات المتتالية للغة وفق شانون حيث اعتمد الانشاء تولد ورود الاحرف المفردة والمترابكبة المؤلفة من حرفين أو اكثر وكذلك جداول معتمدة للاعداد المشوالية . وقد رأينا في حينه احتواء هذه التقريبات على كلمات ذات معنى أو كلمات معقولة بشكل ما في هذا الأدنى .

نذكر القارئ بطريقة انشائنا للنصوص وان المعاني تبدأ بالظهور وتستمر لدى استخدامنا مجموعة من اربع كلمات ننتقل منها لاكمال النص باضافة كلمة في كل مرة ثم اعتبار الكلمات الاربعة الاخيرة وهكذا . ورغم ذلك لا يبقى للنص ككل سياق واحد بل يراوح عبر مجالات متباينة ، والسبب هو انعدام المخطط العام الموجه لتأليف النص وانتقاء الكلمات بالتالي . نلاحظ وضعاً مشابهاً عند الأشخاص المصابين بانفصام الشخصية . يعرض و . هـ . هـسون نموذجاً يمثل خروجاً من السياق

ومراوحة على لسان أحد أبطاله في رواية : الأرض القرمزية ، إذ يتحدث هذا البطل فيقول : لا يصل العلم آتسلمو الى نهاية اي قصة ابداً لانه دائماً يتحرك نحو أرض جديدة .

يمكن أن نضغي على النصوص المنشأة بهذا النحو العشوائي سمة النظم الجديد بأن نطلع الاشخاص الذين يضيف احدهم كلمة في كل مرة على عنوان مسبق ومعتمد للنص .

اطلعتني الدكتور دونالد . ا. دون من مختبر ستانفورد للالكترونيات على مثال لبناء نص بشكل عشوائي بحيث يضيف أحد الاشخاص كلمة في كل مرة بعد اطلامه على آخر كلمة موجودة في النص ، اضافة لمعرفته بعنوان النص : «الرجال والنساء»

وقد اتى النص على النحو التالي :

« أحببت حواء بشدة علفنية او غير كلفي الليلة في أي مكان تموت فيه قبل البلرحة مرة ثانية ومهماحي اساء » .

اما من تجلرب شركة بيل فنعرض النص التالي المنشأ وفق نفس القامدة السابقة مع فارق إطلاع الشخص على الكلمات الثلاثة الأخيرة بدلا من اطلامه على الكلمة الأخيرة فقط . والنص هو :

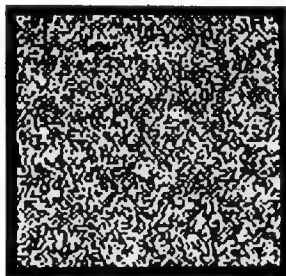
من الحياة

« الحياة تمك عدة رجال حكماء وعقلاء نادراً ما يلومون البلهاء بشكل سطحي . قد تتمجب للمذا . المشاعر الإنسانية ولكن التبادل البدائية وجدت » .

لا شك ان قراءة هذه النصوص ستترافق بضحكتك السخرية والتهكم ، اذ لا يمكن لإنسان عاقل ان ينشأ مثل هذه النصوص . ينتقي الشعراء قليلو الموهبة كلمات لا ترتبط بينها من أجل تحقيق القافية وهم لا ينتمون عادة أي بيت شعر جيد . ذكرنا ذلك لنؤكد انه قد تكون العملية العشوائية بعض الحظ في انشاء نصوص جيدة بالمقارنة مع هؤلاء الشعراء .

هل يمكن الكمبيوتر من انتاج نص واضح الميزات باستخدام احكام القواعد وسلاسل الاعداد العشوائية ؟ قد يستطيع إنشاء كلمات مضحكة بل ونصوص مضحكة تسبب صدمة للقارئ . نستطيع ان نبحر بخيالنا ما شئنا فنتصور كومبيوتر قد جهز بكل عناصر القصة البوليسية ، وانصرف الى تاليف قصة بوليسية بعد ذلك ، ما صاها تكون تلك القصة . على كل حال ليست هذه إلا تصورات وتخيلات .

يمكن توظيف الفنون البصرية لتوضيح نفس النقاط التي اتينا على ذكرها في حالة اللغة والموسيقى . وفعلا فالتشكيل البصري العشوائي هو من وجهة النظر الرياضية الأكثر إدهاشا والأقل احتمالا من كل التشكيلات البصرية تماما كالتشكيل العشوائي المكون من الأحرف الأبجدية او الموجات الصوتية : وللأسف فالتشكيل العشوائي هو تشكيل باهت ، وتبدو التشكيلات المختلفة بالنسبة للعين الانسانية متطابقة دون فروق واضحة بينها . اعرض في الشكل ١٣ - ٥ ١٠٠٠٠ بقعة بيضاء وسوداء موزعة بشكل عشوائي في محاولة لتأكيد هذه الفكرة .



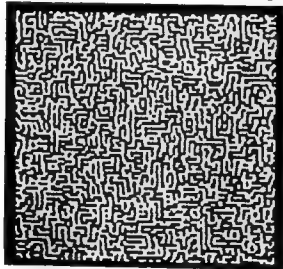
الشكل ١٣ - ٥

إن التشكيل الأخير في الشكل ١٣ - ٥ هو في واقع الأمر من صنع الكمبيوتر لإنشاء هذا التشكيل ضمن دراساته الإدراك الجسم ومعنى الكمبيوتر ، إذ استطاع بيلا جواز العامل في حقل الإدراك أن يدفع النموذج . ذهب جولسر أبعد من ذلك ببرمجة الكمبيوتر للتخلص من العشوائية في هذا النموذج ما أمكن ، وأشد فكرته على جعل الكمبيوتر يتفحص وعلى التتابع مجموعات مكونة من أربعة نقاط متمركزة حول نقطة معينة .

إذا طابق المراكز في لونه (أبيض أو أسود) أحد زوجين من النقاط يجري إبدال لونه إلى الأسود إذا كان أبيضاً ، وإلى الأبيض إذا كان أسوداً . يحقق ذلك حذف الأقطار السوداء أو البيضاء إلا عندما يكون أحد الزوجين أبيضاً والآخر أسوداً أو العكس .

إن اعتماد هذه الطريقة في اختزال العشوائية يفضي بنا إلى الشكل ١٣ - ٦ حيث يبدو المظهر العام وقد أحسن فعلاً . ، حقاً إن منصر العشوائية مطلوب لتأمين التنوع والمفاجأة ، إلا أن النظم هو الوحيد الكفيل بإحداث البهجة .

يمود استخدام العشوائية والنظام في الفن إلى عهد قديمة . يقدم المشكّل تأثيرات مبهرّة بإعطاء تشكيلات عشوائية من قطع الزجاج تناظراً سداسي الأوجه .



الشكل ١٣ - ٦

حقق أحد الرسامين منذ عدة سنوات لوحة جديدة باستقاط عدد من الخيوط على قطع سوداء من الثياب وثبيتها ومن ثم تطيرها وفق ورسمها العشوائي . كما حقق فنان سويسري باستخدام الكمبيوتر لوحات ملونة مزيج من النظام والعشوائية بيع الكثير منها بأثمان عالية .

زودني كل ذلك برؤية فلسفية اصغرية للفن والتي لن امروها الى نظرية المعلومات . وقد وصفت هذه الفلسفة بكونها اصغرية لأنها تهمل من عمد الموهبة والمبقرية وهما العاملان الوحيدان اللذان يجعلان من الانتاج الفني قضية كبيرة .

يسلترم الفن الناجح تقدير الجمهور وموهبة الفنان . يتأثر الناس بعوامل كثيرة غير تلك التي تواجههم عند تأملهم العمل الفني . وإذا حاول شخص ما مقاومة فعل العمل الفني ، فلن يحركه شيء وسيبقى يورداً على اللوام ، وعلى العكس اذا اقتادته رغبة المديح فسيمتدح حتى الأعمال الفنية المتوسطة . مثلاً أنا أحب شخصياً أعمال التراويل الموسيقية التي الفتها بالاشتراك مع زوجة شانون . وفي كثير من الأحيان يفضل بعض المؤلفين أعمالهم الضعيفة . أيضا قد تذهب الجماعات الصغيرة والكبيرة على حد سواء الى تقدير الموضة القصيرة الامد والتي لا تملك اي ميزات فعلية .

يجنح الجمهور من ضمن أشياء أخرى الى تحسس روح الخلق والابداع واكتشاف المعاناة اللاتية من خلال الأعمال الفنية . يجب على العمل الفني أن يملك انساقاً بالغا حد الكمال كي يجلب الاحترام لصاحبه ويمكس هويته الحقيقية .

نفرض أن فناناً ما استطاع انتاج كل الأعمال العظيمة التي نقبلها اليوم على انها من ابداع أسماء كبيرة ومتباينة الطابع من عالم الفن ، وذلك قبل ولادة كل هؤلاء الفنانين . طبعاً سيدهشنا ذلك ، إلا أن هذا الفنان لن ينتزع اعجابنا بسهولة ، ولن نقف منه موقف الاحترام الذي نقفه من كل عمل على حدة كونه يمكس هوية وذاتية محددين . نستطيع

تميز بيكاسو رغم أنه غير مريح . لقد كان حاذقاً في طوابع متعددة ، لذا يصعب إصدار حكم متميز عليه . ما أسهل بالمقابل أن نقدر الفنان مالتيز .

يتوقف تقدير الجمهور للفن على كون الفن مفهوماً من قبل هذا الجمهور . مثلاً النكتة الصينية لن تضحك إلا عند قليل من الأمريكيين ، كما أن عشرة نكات صينية لن تكون مضحكة أكثر من إضحاك نكتة واحدة . إذا كان للفن أن يعطي حق قدره فيجب أن يصلح إلى درجة ما في نفس لغة الجمهور ، وإلا فمهما انطوى على التنوع ، لن يرى الجمهور فيه إلا الرتابة والتكرار . إن دهشتنا المتكررة لا يمكن أن تتحقق إلا بالقلادة على خلفية الابتعاد وليس بالفوضى العشوائية .

يتبنى بعض الفنانين لغة تعلمها جمهورهم على أيدي أساتذة سابقين ، وكان يوهان براهمز واحداً من هؤلاء ، بينما يذهب البعض الآخر إلى تعليم جمهورهم لغة جديدة ، كما فعل الفنون الانطباعيون . لا شك أن لغة الفن تنفر على الدوام ، ول كبار الفنانين علينا منة في هذا المجال إذ يعلموننا على الدوام لغات جديدة . لا يعني ذلك أن نتنكر لأصالة بعض الفنانين الكبار من أمثال باخ وهاندل ، الذين ألّفوا موسيقاهم بلغة الماضي .

إذا كانت اللغة ذات الكلمات الواضحة والعلاقات البينة ضرورية للفن فهي ليست كافية . إن التخلل الميكانيكي بالهت ومخيب . وأفضل شخصياً مفاجآت النشر العشوائي على الشعر المضجر لإوين ميرديث . ربما ستجد الإنسانية في الفن العشوائي البديل المنشود لابتلال الفن الحرفي في عصر انهيار الفنون .

نكتفي بهذا القدر من نظرية المعلومات والفن .

الفصل الرابع عشر

عودة إلى نظرية الاتصال

انه أمر مفرح بكل تأكيد ، أن تساهم فكرة جديدة بحل جملة كبيرة من المشاكل ، إلا أن الفكرة الجديدة لن تستلحل الوقفة عندها ما لم تبرهن أن لها قيمة عملية مهما كانت تلك القيمة محدودة .

انتقدني أحد الباحثين في نظرية المعلومات لأنني سبرت في هذا الكتاب إمكانية تطبيق نظرية المعلومات في مجالات اللغة ، علم النفس ، والفن ، فبالنسبة له يبدو العلاقة بين نظرية المعلومات وكل من فروع المعرفة هذه علاقة هامشية وغسبية . لماذا تنتزع القارئ من تطبيقات نظرية المعلومات المثبتة والأكثر أهمية لتجنب به نحو تطبيقات أخرى غير واضحة المعالم وقليلة الأهمية على الأقل في الوقت الحاضر ؟

يعود ذلك من جهة ، لرفضه علانية دفتني لشرح العلاقات الممكنة بين نظرية المعلومات في إطارها المحدد والضيق وفروع أخرى من المعرفة ظهرت علاقتها بهذه النظرية من خلال كتليات الآخرين . ومن جهة أخرى أعتقد أن نظرية المعلومات تساعدنا كي نتحدث بشكل معقول أو على الأقل في إمكاننا ما أمكن من الحديث غير المعقول ، بصورة خاصة في مجال اللغويات والفن وعلم النفس . ومهما يكن من أمر فهناك خطر كبير من الانزلاق وراء التأكيد على هذه القضايا عبر كتاب يتحدث من نظرية المعلومات .

تؤكد على الخطأ الفاحش الذي نرتكبه اذا اعتقدنا أن أهمية نظرية المعلومات تنبع من ارتباطاتها العريضة مع فروع كثيرة كاللغة ، السيبرنتيك ، علم النفس ، والفن . ان ترسيخ هذا الاعتقاد ما هو إلا تكرار لأغلاط ارتكبت بحق اكتشافات أخرى مهمة .

وهكذا فقد أحيط عمل نيوتن في عصره بجدل فلسفي ومعرفي ، وارتبط لعدة سنوات تالية بشمولية مزعومة أساءت لطبيعته الحقيقية . إلا أن أينشتاين استطاع أن يرى بوضوح أكثر عندما أكد بأن العقل ضعيف ومحدود إذا ما قورن على خلفية مهمته اللانهائية ، ومضى بعد ذلك واصفاً عمل نيوتن بأنه حقق الهدف المنشود المتمثل بولادة علم الميكانيك السماوي والذي تم تأكيده آلاف المرات من قبل نيوتن نفسه ومن تلاه .

وللمدالة نقول ان ميكانيك نيوتن كان فعالاً منذ أيام نيوتن وساهم في حل مشاكل لم يكن ليتخيلها نيوتن ومعاصره ، إلا أن هذا الميكانيك لم يتمكن من حل كل مشاكل العلم ، كما تصور بعض الفلاسفة المتفائلين .

يبدو لي المضمون الهام الاكيد لنظرية المعلومات بسيطاً وواضحاً . فهي تنطوي على أفكار السرع المعلوماتية او انثروبي المصادر المستقرة ، السعة المعلوماتية للأقنية ذات الضجيج وبدون الضجيج ، وكذلك الترميز الفعال للرسائل التي يولدها المصدر بحيث يتحقق البث الخالي من الأخطاء وبسرعة تساوي سعة القناة . اما عالم نظرية المعلومات فهو عالم أنظمة الاتصالات الكهربائية المتضمن للأساليب الذكية في تصميم تلك الأنظمة .

أجد من المناسب في ختام هذا الكتاب ان أبتعد عن الممكنات (او المستحيلات) المحتملة ذات الطابع العام وأن أطرح عوضاً عن ذلك السؤال التالي : ماذا فعل باحثوا نظرية المعلومات وماذا يفعلون أبعد من هذا الكتاب ، بكلمات أوضح ، ماذا فعل هؤلاء الباحثون لتأهيل نظرية المعلومات .كعلم متماسك صلب يمكن قبوله أبعد من وضعه الحالي كمجموعة نبوءات تدور حولها المناقشات .

نجد هنا مجالا واسعا من الأبحاث يستلزم عرضها كتابيا آخر .
لذا سيقصر هذا الفصل على عرض موجز لأعمال نظريي المعلومات بعيد
نشر شانون لبحثه الأول ، كما سيحاول تعريف القارئ بأهداف نظرية
المعلومات في إطارها الضيق ، وأخيرا سيبحث القارئ على متبعة هذه
النشاطات بتفصيل أكبر .

سمى باحثوا نظرية المعلومات الى تطبيق آخر لانتروبي السرعة
المعلوماتية لمصدر رسائل غير ترميز وبت المعلومات . يرمي الرجال
الطموحون الى إعطاء الصورة معنى أكبر ، أما الأكثر تواضعا فيقنعون
بأي تطبيق صحيح ذي معنى .

كان التطبيق الوحيد في هذا السياق هو ذلك الذي قدمه ج. ل.
كيلي الابن عام ١٩٥٦ . يتعلق هذا التطبيق باللقطة على أحداث عشوائية
حيث يملك المراهن معلومات داخلية من خرج الحدث الذي سيراهن
عليه . فستطيع أن نتخيل مثلا أن أحجار النرد قد قلعت لثو (أو أن
السياق قد ابتدأ) وأن المراهن المفضل يعلم ذلك وقد تلقى بعض
المعلومات من النتائج ، إلا أن الشخص الذي سيراهن معه لا يعرف ذلك
ويعطي المراهن فرصا عادلة على أساس احتمالات النتائج .

يتلقى المراهن معلوماته هذه على شكل وحدات متتالية من البيت
أي جملة محدود من طراز نم أو لا على مجموعة أسئلة مطروحة . يمكن
مثلا إعطي المعلومات أن يخبر عما إذا استقرت قطعة النقد على الطرة
أو التفتش بإرسال بيت واحدة من المعلومات ، أو يمكن لهذا المعطي أن
يخفض النتائج الممكنة لرمي حجر النرد من ٦ الى ٣ بإرسال بيت واحدة
من المعلومات تعلم المراهن عما إذا كان الوجه السطحي لحجر النرد
زوجيا أو فرديا .

إن خير وسيلة لشرح عمل كيلي بعد هذه المقدمة هي سرد موجز
لهذا العمل : إذا كانت رموز الدخل لقناة اتصال تمثل إمكانات الخروج
لعائلة عشوائية يجري المراهن عليها بشكل يتسق مع احتمالاتها ، فإن

بإمكان القامر الذي يستخدم المعرفة الموفرة له من خلال الرموز المستقبلية أن يزيد أرباحه بشكل أسّي . تساوي السرعة الاسمية المظني لتنامي أرباح القامر سرعة بث المعلومات عبر القناة . يمكن تعميم هذه النتيجة لتضمين حالة الاحتمالات الاتفاكية .

وهكذا نصادف حالة تلعب فيها سرعة البث دوراً رئيسياً على الرغم من عدم التطرق لقضية الترميز ضمن الحالة المعتبرة . أما فيما مضى فلم يكن لهذه الكمية من أهمية إلا عبر نظرية لساتون أكدت أنه باستخدام الترميز المناسب يمكن بث الأرقام الثنائية عبر القناة وفق السرعة المشمل اليها وبأقل خطأ ممكن .

وفي لغة الأعداد يسوي عامل لمزيد أرباح القامر :

ن
٢

حيث n هو عدد مرات المراهنة ، r هو المعدل الوسطي لواحدات البيت من المعلومات التي تبث للمراهن في كل مراهنة .

إذا بدأ هذا التطبيق تفافاً ، فعلى القلويء أن يتأمل حقيقة أنه التفسير الرياضي الوحيد المكتشف إلى جانب التطبيق المعلوماتي الذي قدمنا له فيما مضى من فصول .

يمكن أن يخطر على البال ، لدى تقديم نظرية المعلومات ، إمكانية أخرى لاستخدام نظرية المعلومات غير البحث عن تفسير مستحدث لـ سرعة البث . نشر لساتون عام ١٩٤٩ بحثاً طويلاً بعنوان : « نظرية الاتصالات للأجهزة السرية » . إلا أنه من المشكوك فيه أن يكون هذا البحث قد قدم مساهمة كبيرة لحل الشيفرات ، وإن كان قد هيا ولأول مرة نظرية متكاملة من الوثائق السرية وتحليلها ويعتبر لذلك مادة غنية للمتخصص في هذا المجال .

ربما أننا لن نستطيع الخوض في تفاصيل هذا البحث ، إلا أنني سأحاول إعطاء فكرة من محتواه .

ماذا تكون عليه حالة محفل الوثائق السرية عندما يضع يده على رسالة جرى ترميزها بطريقة مجهولة ، انه يجهل أمرين اثنين : الرسالة نفسها وطريقة ترميزها التي يمكن ان نطلق عليها اسم المفتاح .^١

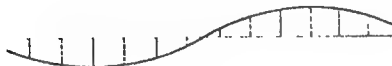
يحدث في بعض الاحيان ان يكون المحلل ملماً بالاساليب العامة للترميز . وكمثال بسيط يمكن ان يفترض المحلل ان الترميز جرى باستبدال كل حرف من الابجدية بحرف آخر وفق قواعد محددة .

يمكن ان تكون الرسالة المعروضة للمحل طويلة او قصيرة ، واذا احتوت على ثلاثة احرف فقط مثلاً : الت ، امكنة تفسيرها بكلمة : نهر ، او كلمة : قمر او اي كلمة اخرى مؤلفة من ثلاثة احرف مختلفة . اذا كبرت الرسالة . فان عدد النصوص الممكنة ينقص بالمقابل ، واذا كانت الرسالة كبيرة بما فيه الكفاية ، لا يبقى من تفسير لها الا نص واحد مقابل وحسب .

عبر شانون عن نقص الرتبة هذا المتعلق بالنص الحقيقي الذي جرى ترميزه بشكل يقيم الرسالة المعنية على انها مجرد تفير في الالتباس . تعطي الرتبة ت (س) المعرفة في الفصل الثامن درجة الالتباس في النص الحقيقي الذي تم ترميزه بهدف الوصول الى الرسالة قيد البحث . استطاع شانون اجراء حسابات اثبت بموجبها ان هذه الرتبة تتناقص بازدياد عدد الاحرف في الرسالة . وعندما تصبح هذه الرتبة مساوية للصفر ، فانه لا يبقى الا امكانية واحدة للنص الذي جرى ترميزه ، ويصبح من حيث المبدأ حل الرسالة المعنية ممكناً .

ما هي انواع المشاكل التي واجهت او تواجه الآن نظري المعلومات ؟ تتعلق بعض هذه المشاكل بمسألة اخذ العينات يستخدم نظري المعلومات تكميك اخذ العينات بهدف تمثيل اشارة مستمرة متغيرة ذات حزام تواترات محددة بواسطة سلسلة من الاعداد هي في الواقع سعات الاشارة مأخوذة كل ($\frac{1}{T}$) ثانية ، حيث س هو عرض حزام الاشارة .

أن مجموعة العينات الممكنة الإشارة مخلوذة الحزام ليستوحيدة من نوعها ، إذ يمكن أخذ هذه العينات عند لحظات متفاوتة . وهكذا فوفق الشكل ١٤ - ١ يمكن أن تكون الخطوط الشاقولية المستمرة هي العينات المنشودة أو الخطوط الشاقولية المتقطعة ، أو أي خطوط أخرى مأخوذة عند نقاط أخرى . وفي الواقع ليس من الضروري أن تفصل العينات من بعضها بفترات زمنية متساوية ، بشرط أن تؤخذ ٢ من عينة في كل ثانية .



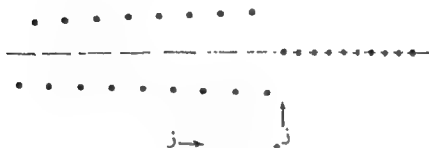
الشكل ١٤ - ١

أن شرط تمثيل الإشارة المحدودة الحزام بشكل وحيد باستخدام ٢ من عينة في كل ثانية هو استخدام كل العينات بدءاً من لحظة لا نهائية في الماضي وحتى لحظة لا نهائية في المستقبل إلا أننا قد نحتاج في بعض الأحيان لاعتبار جزء من الإشارة محدودة الحزام ، أو إشارة محدودة الحزام معلومة تقريباً باستثناء فترة محددة من الوقت ، ونرغب بتمثيل هذه الإشارة بدلالة العينات .

أول ما يخطر على البال هو السؤال المتعلق بتمثيل إشارة قصيرة أو جزء من إشارة بسلسلة متناهية من العينات دون الأخذ بعين الاعتبار لتقنيات السابقة أو اللاحقة . للأسف أن اعتبار عدد متناه من العينات لن يحدد إشارة وحيدة محدودة الحزام ، إذ يمكن أن تمر إشارات مختلفة محدودة الحزام عبر هذا العدد المنتهي من العينات ، وإذا كانت الإشارات ذات سمات كبيرة خارج نطاق العينات المعتبرة فإن الإشارات ضمن هذا النطاق ستكون مخطئة بالتالي .

صحيح أن هذا قد يبدو فثلا ، ولكننا نستطيع تحديد عينات معينة متتالية ونصطلح على أن كل العينات السابقة والتالية لهذه المجموعة هي عينات صفرية بمعنى أن كلا منها تساوي الصفر ، إذ نستطيع أن نتصور أن الإشارة المتبرة ضمن النطاق المحدد ستفق مع العينات المتبرة ، بينما ستكون إشارة صفرية تقريبا حثيما تكون العينات صفرية .

نفرض على سبيل المثال مجموعة من العينات تصبح صفرية بعد لحظة ز ، بينما تكون غير صفرية قبل هذه اللحظة ، كما في الشكل ١٤ - ٢ تمثل هذه العينات إشارة وحيدة محدودة الحزام ، ببساطة لأنها مأخوذة عند كل الأزمنة بدءا من الماضي وحتى المستقبل . هل ستكون هذه الإشارة صفرية فعلا بعد اللحظة ز ؟



الشكل ١٤ - ٢

للأسف ، أثبت هـ . و . بولاك من مختبرات بيل أن هذه النتيجة ليست لازمة . نفرض أننا نتساءل من الجزء من القدرة الكلية لهذه الإشارة الذي يحمله قسم الموجة الحادث بعد عشرة لواتي أو عشرين دقيقة أو ربما بعد خمسين سنة من اللحظة ز ، نتذكر في هذا السياق أن كل العينات صفرية بعد اللحظة ز .

تتلخص الإجابة المدهشة لهذا التساؤل في أن نصف قدرة الإشارة تقريبا يمكن أن يحمل على القسم من الإشارة الحادث بعد أي لحظة زمنية تتبم بكونها فاصلة بين قيم العينات غير الصفرية قبلها ، وقيم

العينات الصفرية بعدها . وهكذا فقد تكون الإشارة صفرية عند كل لحظة بمد ز. توجد عندها أي عينة ، وفي نفس الوقت غير صفرية فيما بين هذه العينات .

لا تزال الجهود المبذولة لتمثيل الاشارات المحدودة الطول باستخدام العينات تتعرض عبر عوائق رياضية ، ويعمل الرياضيون ما يستطيعونه لشق الطريق بين هذه العقبات .

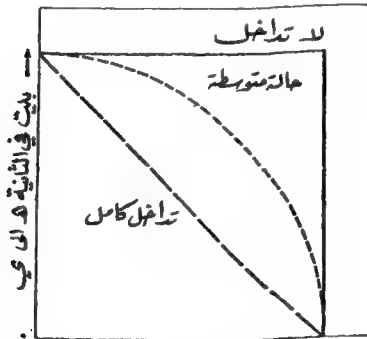
يشير عملا بولاك وسليبيان الى ان كلا طريقتي أخذ العينات والامواج الجيبية ليستا الطريقتين المناسبتين لتمثيل الاشارات المحدودة زمنيا ، وقد وظف هذان الرياضيان توابع رياضية أخرى لتحقيق التمثيل المطلوب دميت بالتوابع الكروية المتطاولة .

يوضح المثال التالي جانباً محيراً من نظرية المعلومات . نفرض اننا نمثل في مبرقة النقطة نبضة موجبة والخط نبضة سالبة ، ونفرض ان احداً من محبي الدملبات مكس الوصلات الكهربائية بحيث يتم استقبال سالبة عندما يتم ارسال نبضة موجبة والعكس بالعكس . تؤكد نظرية المعلومات ان سرعة الارسال ستبقى نفسها في هذه الحالة لان هذا العمل لم يقدم أي رغبة اضافية . الا اننا سنشعر ان ضرراً ما قد حل بنظام الاتصال ، وسيكون هذا الضرر اكبر اذا طبع جهاز الاستقبال حرفاً مغايراً للحرف المرسل وانسحب ذلك على كل الاحرف .

أدقض هذا المثال مضجع شانون طعمد الى صياغة نظرية تغطي الوضع الناشئ عنه ، إذ عرف من خلالها معياراً للأمانة . وهكذا يفرض شانون عقوبة معينة على استبدال الحروف الصوتي بحرف ساكن وعقوبة أخف على استبدال الحروف الصوتي بحرف صوتي آخر . لم يعد الى تقييم الضرر الحادث للرسالة بسبب الاخطاء المتسقة أو الاخطاء العشوائية . اذا كان الضرر ناجماً عن الاخطاء العشوائية لقناة ذات ضجيج ، يوضح شانون كيفية تصفيره الى حد أدنى ، كما يبين عدد واحدات البيت في كل ثانية اللازمة لبث الإشارة بدرجة معينة من الأمانة .

انجز شانون ايضا عملاً ضخماً فيما يتعلق ببث الرسائل عبر الشبكات التي تتداخل فيها رسالة مع اخرى . ان أبسط أنواع هذا التداخل هو حالة قناة وحيدة بث عبرها رسالتان بالجامعين متعاكسين بين تقطعتين منها ه ، ي . نفرض بهدف التسهيل ان مواصفات عمل القناة هي نفسها في الاتجاين ه ، ي ، ي ه .

نقوم برسم الخط البياني الممثل للعلاقة بين سعة القناة في الاتجاه ه ، ي ، وسعة القناة في الاتجاه ي ه ، وهو الخط المبين في الشكل ١٤ - ٣ تخيل حالتين بسيطتين ، في الاولى لا يحدث تداخل بين الاشارة المنطلقة من ه الى ي وبين الاشارة المنطلقة من ي الى ه . يكون الخط البياني الممثل لهذه الحالة من الجزء الافقي المستمر الممثل لسعة القناة من ي الى ه والجزء المائل المشاؤولي المستمر لسعة القناة من ه الى ي .



بث في الثانية ي الى ه

الشكل ١٤ - ٣

أو نستطيع ان نتخيل أن ارسالنا عند لحظة معينة سيقنصر على أحد الاتجاهين هـ الى ي ، او ي الى هـ . وهكذا اذا حافظنا على جهة الارسال هـ ي في تلك الحالات ، فإن الارسال في الاتجاه الماكس ي هـ سيستغرق ثلثي الحالات الباقية ، وهكذا يجب أن يكون مجموع سمتي القناة في الاتجاهين هـ ي ، ي هـ ثابتا في هذه الحالة والنتيجة هي الخط المتقطع المائل بزاوية ٤٥° في الشكل ١٤ - ٣ .

اما في الحالة المتوسطة حيث يكون هناك شيء من التداخل بين الارسالين في الاتجاهين نحصل على منحني كذاك المتقطع في الشكل ١٤ - ٣ .

لازالت مشكلة الترميز الفعال الوجه الرئيسي لاعمال الباحثين في نظرية المعلومات ، ففي قناة متقطعة يسمى هؤلاء لتصحيح عدد من الأخطاء في سلسلة من الأرقام الثنائية المرسل .

يركز هؤلاء الباحثون جهودهم أيضا للحصول على أحسن ترميز معلوماتي عبر قناة مستمرة ذات ضجيج . نشر شانون عام ١٩٥٩ بحثا مطولا توصل فيه إلى الحدين الأعلى والادنى لسرع انتشار الأخطاء الطرق ترميز مختلفة التعقيد وذلك في حالة قناة مستمرة ذات ضجيج غاوسي . تفضل الآن الرموز الملتفة ورموز فيتري ويسمى هياقرة الرياضيات إلى رموز أجود وأرخص .

ولا يقتصر البحث من طرائق جديدة للترميز على هؤلاء الباحثين ، بل يتعلوهم إلى المهندسين الساعين لتحسين الاتصالات الكهربائية والذين يجربون ترميز الاشارات التلفزيونية والصوتية بأقل عدد ممكن من الأرقام الثنائية ، وقد سبق أن تعرضنا لحلولهم في الفصل السابع . تزداد أهمية الترميز الفعال خاصة لأن الارسال الرقمي للاشارات (كما في تعديل ترميز النبضات) أخذ يحل تدريجيا محل الاتصالات التماثلية ، وسترزاد تلك الأهمية أكثر وأكثر عندما نعلم طريقة الترميز بهدف الحفاظ على السرية والخصوصية إذ أن انبج الوسائل للحفاظ على السرية هي الوسائل الرقمية .

يسعى المهندسون أيضا لابتداع طرائق بسيطة وفعالة لتصحيح الأخطاء خاصة تلك التي تحدث أثناء إرسال الاشارات الرقمية عبر المداير الهاتفية يزداد استخدام أسلوب الاوسال الرقمي في كل المجالات العسكرية والمدنية . تمتد خطوط الهاتف تقريبا في كل مكان ، والمحافظة على سرعة بث جيدة للمعلومات نستخدم دوائر صوتية . هنا يمكن اصلاح الاخطاء باكتشافها واعادة بثها ، الا ان استخدام الترميز لاصلاح الاخطاء هو امر مفضل أيضا .

تفرض بعض الظروف الخاصة طرقا معينة للتعديل ، من هذه الظروف حالة الراديو المتحرك ، ففي المدن تصل الاشارات الى السيارات بمدد ارتدادها من مجموعة من الابنية وهكذا يتم استقبال نبضة قصيرة كمسحة من النبضات التي ارتطمت عبر مسافات مختلفة وفي مسارات متباعدة . تحتاج هذه الحالة الى دراسة متأنية لاكتشاف أحسن السبل في استخدام حزام من التواترات بالغ العرض بهدف تحسين البث .

تطرح الاتصالات العسكرية ، خاصة في مواجهة التشويش ، هدفا من المشاكل الهامة .

قد يعتقد البعض أن كل هذا ليس الا ترفا هندسيا لا يقاوم بالافاق الفلسفية التي تفتحها اماننا نظرية المعلومات . هل يمكن الفهم المستند الى الاعلام ، او للتقدير المحب للطبيعة ، وكذلك للمزايا والفروق بين الرسامين الانطباعيين الفرنسيين او الواقعيين الهولنديين ، من أن يكون ذي معنى كما في حالة المواجهة المفاجأة لقن جديد وغريب كالقن الهلالي .

الا أن الناقد الفني الذي يتلعب باخلاص كل التفاصيل لا شك سيحوز في النهاية بصيرة وقيما سليمة مثلما سيكون عليه حال هاوي الفنسون المرهف الحس . يبدو ان هناك احكاما تثقيفية تفرض تقييم انتاج معين لما هو عليه وليس بسبب تأثيره على عقول الناس غير المسلمين به . اتمنى أن يكون لهذا الكتاب جوانبه المثيرة ، الا اتنى لا أبني من ورائه تكوين وجهة نظر لدى القارئ عن نظرية المعلومات تختلف عن تلك التي يتمسك بها العاملون ذوو الخبرة في هذه النظرية ، إذ من الافضل أن أنهى هذا الكتاب في اجواء متماسكة وزينة .

مسحور رياضي

يملك القارئ، ملء حريته في استخدام أو عدم استخدام الرياضيات الواردة في هذا الكتاب بما في ذلك عدد من العلاقات الموزعة هنا وهناك ، ولربما اذا هو تعامل مع رياضيات هذا الكتاب ، لحكم عليه انه أولا وآخر كتاب رياضي .

نعم انه كتاب رياضي ، فنظرية الاتصالات هي نظرية رياضية ، ولأن هذا الكتاب يعرض لهذه النظرية ، فهو ملزم لذلك بالرياضيات . يجب على القارئ في هذا السياق أن يميز بين الرياضيات وبين المصطلحات المستخدمة . إذ يمكن للكتاب أن ينطوي على كم كبير من الرياضيات من دون أن يحتوي على رمز واحد أو أشارة مسلوطة .

لقد تطرق الهنود البابلليون الى مجالات رياضية واسعة بما في ذلك اجزاء هامة من الجبر ، وذلك دون ان يستخدموا أكثر من الكلمات والجمل ، إذ أن المصطلحات الرياضية ولدت بعد ذلك ، تهدف هذه المصطلحات إلى تبسيط الرياضيات ، وهي تحقق هذا الغرض فعلاً لمن يصبح ملماً بها . أما ما تفعله المصطلحات المذكورة فهو استبدال سلاسل طويلة من الكلمات المتواترة الاستعمال برموز بسيطة ، وتوفر أسماء بسيطة للكميات التي نتحدث عنها ، كذلك تهوى لصياغة دقيقة للعلاقات وعرضها من ثم بشكل بياني بحيث تترك المعين في نظرة واحدة ارتباطات الكميات ببعضها تلك الارتباطات التي لن تظهر وستضيع بين ثنايا الجمل الواصفة لها ، وستفوت فرصة كبيرة لادراك الصيغة الكلية لجمل العلاقات دفعة واحدة .

وهكذا يقتصر دور المصطلحات الرياضية على تمثيل الرياضيات والتعبير عنها ، تماماً كما تمثل الأحرف الكلمات والعلامات الموسيقى . يمكن أن تمثل المصطلحات الرياضية ما لا معنى له أو لا شيء تحديداً ، كما في حالة الأحرف أو العلامات الموسيقية المرصوفة بشكل عشوائي . ينشأ بعض غربيي الاطوار احياناً نصوصاً مليئة بالمصطلحات الرياضية وهي لا تعني في واقع الامر اي نوع من الرياضيات .

حاولت في هذا الكتاب ان اضح كل الأفكار الهامة في كلمات وجمل ، ولأن المصطلحات الرياضية تمنح فرصة أكبر للفهم البسيط للأشياء فقد عمدت في معظم الحالات الى اقحام هذه المصطلحات في صلب البحث . لقد شرحت ذلك عبر هذا الكتاب الى حد ما ، وسأعرض هنا وجيزاً لهذه الشروح . وكذلك سأجرؤ على طرح بعض القضايا البسيطة المرتبطة التي لم تستخدم في هذا الكتاب آملاً أن يفيد منها القارئ في مجالات اخرى .

أول ما يواجهنا في المصطلحات الرياضية هو استخدام الأحرف لتمثيل الأعداد وأشياء أخرى أيضاً ، ففي الفصل الخامس مثلاً استخدمنا الرمز m للدلالة على زمرة أو سلسلة من الرموز أو الأحرف، ربما زمرة من الأحرف ، بينما وظف الرمز m لتمييز أي الزمر نعني . يمكن مثلاً في حال كون الرمز m مساوياً الواحد أن تكون الزمرة m بالتقابل هي $A \times A$ ، بينما لقيمة أخرى مثل ١٢١ ، قد تكون الزمرة K^2 أي D .

نستخدم في حياتنا العمليات الأربعة المعتادة : الطرح ، الضرب ، التقسيم ، والجمع بشكل متواتر . نستخدم أحياناً الأحرف للدلالة على الأرقام الواردة في هذه العمليات : مثلاً :

$$\begin{array}{l} \text{الجمع :} \\ 3 + 2 \\ 2 + 3 \end{array}$$

نقرأ العملية الثانية على الشكل : ٢ زائد د ، ونفسرها على أنها حاصل جمع عددين يمثل أحدهما ٢ ويمثل الآخر د .

$$\begin{array}{l} \text{الطرح : } ٥ - ٤ \\ \text{ك - ر} \end{array}$$

بالمثل نقرأ العملية الثانية ك ناقص ر .

$$\begin{array}{l} \text{الضرب : } ٣ \times ٥ \text{ أو } ٥ \cdot ٣ \text{ أو } (٣)(٥) \\ \text{س} \times \text{ع} \text{ أو } \text{س} \cdot \text{ع} \text{ أو } (\text{س})(\text{ع}) \end{array}$$

إذا لم نستخدم الأقواس في التمثيل الأخير لقرائنا الجداء ٥×٣ على أنه العدد $٥ \cdot ٣$. نستطيع استخدام الأقواس للدلالة على جداء أي كميات نرغب بضربها ، مثلاً يمكننا كتابة س ع على الشكل $(\text{س})(\text{ع})$ ، إلا أننا لا نحتاج ذلك في معظم الحالات . نقرأ $(٣)(٥)$ على الشكل ٣ ضرب ٥ ، بينما نقرأ س ع كحرفين متتالين : س ع بدلاً من قراءتهما على الشكل س ضرب ع .

$$\begin{array}{l} \text{التقسيم : } ٦ \div ٣ \text{ أو } \frac{٦}{٣} \text{ أو } ٦ / ٣ \\ \frac{١}{\text{ص}} \text{ أو } ١ / \text{ص} \end{array}$$

نقرأ عادة $\frac{١}{\text{ص}}$ وفق العبارة ١ على ص وليس ١ تقسيم ص .

تعامل الكميات المتضمنة في أقواس كعدد واحد ، مثلاً :

$$٢ = \frac{٦}{٣} = \frac{(٤+٢)}{٣}$$

$$\begin{array}{l} ٢٤ = (٢)(١٢) = (٢)(٨+٤) \\ \text{ح} + \text{ح} = ٢ + ٢ = ٤ \end{array}$$

نقرأ (١٢ + ب) على الشكل ١ زائد ب ، او على الشكل : الكمية ١ زائد ب ، اذا ادى الشكل الاول لبعض التشويش . وهكذا اذا قلنا ح ضرب ١ زائد ب لكان المعنى الممكن : ح ١ + ب على الرغم من اننا نقرأ العبارة الاخيرة وفق ما يلي : ح ١ زائد ب . اما اذا قلنا ح ضرب الكمية ١ زائد ب لكان واضحاً اننا نمني : ح (١ + ب) .

استخدم مفهوم الاحتمال في هذا الكتاب بشكل متواتر . يمكن ان نقول مثلاً ان احتمال الرمز ذي الترتيب م في سلسلة من الرموز هو ح (م) . نقرأ ذلك وفق الصلابة : ح - م .

يمكن ان تكون الرموز كلمات ، اعداد ، او احرف ويمكن ان نتصور جدولة الرموز حيث تشير اعداد مختلفة للقيم الممكنة للرمز م مثلاً وما يقابل هذه القيم من احرف . يوضح الجدول التالي هذه الفكرة :

القيم م	الحرف المقابل
١	١
٢	ب
٣	ت
٤	ث
٥	ج
٦	ح
.	.
.	.
.	.
الخ	الخ

عندما نود الاشارة الى احتمال حرف معين ، ج مثلاً ، نستخدم المصطلح ح (ج) لان العدد ج يحدد الحرف ج في الجدول ، الا اننا نكتب عوضاً عن ذلك وبهدف التبسيط ح (ج) .

ما هو هذا الاحتمال ، أنه نسبة عدد مرات ورود الحرف المعني الى عدد الاحرف الكلي في مقطع معين . وهكذا اذا ورد الحرف ي ١٣٠٠٠٠ مرة في نص يحتوي على ١٠٠٠٠٠٠ حرف كان ح (ي) مساوياً لـ :

$$\text{ح (ي)} = \frac{١٣٠٠٠٠}{١٠٠٠٠٠٠} = ١٣\% \text{ او } ١٣ \times ١٠^{-٢}$$

نتحدث أحيانا عن احتمال وقوع حادثين معا ، إما في وقت واحد ، أو على التتابع . نستخدم مثلا الحرف س للدلالة على الإشارة المرسلة والحرف ص للدلالة على الإشارة المستقبلية ، ويكون المصطلح ح (س، ص) دالا في هذه الحالة على ارسال س واستقبال ص . نقرأ هذا المصطلح وفق المبصرة : احتمال س ص حيث نمبر من الفاصلة بوقفة قصيرة يمكن مثلا أن نرسل على وجه التخصيص الحرف و ونستقبل الحرف ب ، ويكون احتمال هذا الحادث ح (و ، ب) ، لما الأمثلة الأخرى من ح (س ، ص) فكثيرة منها : ح (آ ، آ) ، ح (ك ، د) ، الخ حيث أن كل هذه الأمثلة تنتج عن تمويضات مناسبة في المصطلح ح (س ، ص) .

نتعامل أيضا مع الاحتمالات الشرطية . مثلا إذا أرسلنا س ، ما هو احتمال أن نستقبل ص ، نصلح على كتابة هذا الاحتمال الشرطي بالرمز ح (ص | س) ونقرأه وفق المبصرة ح | س بدلالة س . يستخدم بعض المؤلفين المصطلح ح (س | س) للدلالة على الاحتمال الشرطي والذي يقرأ على الشكل : احتمال ص لدى توفر س . استخدمت شخصيا المصطلحات التي تبناها شانون في بحثه الأصلي من نظرية الاتصالات .

نكتب الآن علاقة رياضية بسيطة ثم نحاول تفسيرها :

$$\text{ح (س ، ص)} = \text{ح (س)} \times \text{ح (ص | س)}$$

أي أن احتمال مواجهة س ، من سوية تساوي احتمال مواجهة س لوحدها مضروباً في احتمال مواجهة ص عندما تكون قد واجهنا س للتو يمكن أن نصيغ هذا التفسير بشكل آخر فنقول إن عدد مرات الورد المشترك للرمزين س ، ص يساوي عدد مرات ورود الرمز س مضروباً بنسبة ورود الحرف ص بالقرنة مع الأحرف الأخرى .

نحتاج في كثير من الأحيان لجمع عدد من الأشياء مع بعضها ، فمثل هذه العملية بالرمز Σ وهو مقلوب الحرف اليوناني سيكما . نفرض أن الرمز ص يمثل عدد صحيح ، أي أن ص يمكن أن يكون ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، الخ ونفرض أننا نود ترميز المجموع :

$$0 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + \dots$$

الذي يساوي بالطبع ٣٦ . نكتب هذا المجموع على الشكل :

$$\begin{aligned} 8 &= \text{ص} \\ \Sigma &= \text{ص} \end{aligned}$$

ونقرؤه : مجموع ص من ص تساوي صفر وإلى ص تساوي ٨ . هنا يعني الرمز Σ مجموع ، بينما المساواة ص = ٠ ، ص = ٨ تمييزان من ص = ٠ إلى ص = ٨ . وأخيراً يعني ورود ص على اليسار أن ما نجمعه هو الأعداد الصحيحة ذاتها .

يمكن أن تكون هناك كميات مختلفة يلعب ص بالنسبة إليها دور الدليل . مثلاً احتمالات الأحرف وفق الجدول التالي :

قيمة ص	الحرف المقابل	احتمال الحرف ح (ص)
١	ا	٠.٠٣١٠٥
٢	ب	٠.٠٤٦٨
٣	ت	٠.٠٨١٥١
٤	ث	٠.٠٧٩٩٥
٥	ج	٠.٠٧٠٩٨
٦	ح	٠.٠٦٨٨٢
٧	خ	٠.٠٦٣٤٥
٨	د	٠.٠٦١٠١
٩	ذ	٠.٠٥٢٥٩
١٠	ر	٠.٠٣٧٨٨
١١	ز	٠.٠٣٣٨٩
١٢	س	٠.٠٢٩٢٤
١٣	ش	٠.٠٢٧٥٨
١٤	ص	٠.٠٢٥٣٦
١٥	ض	٠.٠٢٤٥٩
١٦	ط	٠.٠١٩٩٤
١٧	ظ	٠.٠١٦٨٢
١٨	ع	٠.٠١٦٨٢
١٩	غ	٠.٠١٥٣٦
٢٠	ف	٠.٠١٤٤٠
٢١	ق	٠.٠٠٩١٩
٢٢	ك	٠.٠٠٤٢٠
٢٣	ل	٠.٠٠١٦٦
٢٤	م	٠.٠٠١٣٢
٢٥	ن	٠.٠٠١٢١
٢٦	هـ	٠.٠٠٠٧٧
٢٧	و	٠.٠٠٠٣٠
٢٨	ي	٠.٠٠٠١٠

إذا أردنا جمع هذه الاحتمالات لكتبنا :

$$\begin{array}{c} ٢٨ \\ \text{ص} = ١ \text{ ح (ص)} \end{array}$$

ونقرأ هذا المجموع : مجموع ح (ص) من ص تسوي ١ الى ٢٨ تسوي هذه الكمية الى الواحد تقريباً . إن نسبة عدد مرات ورود الحرف أ في كل حرف مضافة الى النسبة المقابلة في حالة ب وهكذا لكل الاحرف يصل بنا الى نسبة ورود أي حرف في الحرف أي ؟ .
إذا كتبنا :

$$\begin{array}{c} ٢٨ \\ \text{ص} \end{array} \text{ ح (ص)}$$

فنعني المجموع لكل قيم ص ، أي كل ما يمثل أي شيء . ونقرؤه : مجموع (ص) عبر ص . إذا كان ص حرفاً أبجدياً فسننفذ عملية الجمع ال ٢٨ احتمالاً مختلف .

نتعامل أحياناً مع تعابير تتضمن حرفين مثل ص ، ص ونرغب بإجراء عملية الجمع بالنسبة لأحد هذين الدليلين . يمكن أن يكون الرمز ح (ص ، ص) هو احتمال ورود الحرف ص متبوعاً بالحرف ص ، في حالة زوج الاحرف ر د مثلاً . يكون هذا الاحتمال : ح (ر ، د) ، ونكتب بشكل مشابه :

$$\begin{array}{c} ٢٨ \\ \text{ص} \end{array} \text{ ح (ص ، ص)}$$

ونقرأ هذا المجموع : مجموع ح د ص ، ص عبر ص ، يعني ذلك اعتبار كل قيم ص الممكنة وإجراء المجموع عبرها .

$$\begin{array}{c} ٢٨ \\ \text{ص} \end{array} \text{ ح (ص ، ص)} = \text{ح (ص)}$$

ونقرأ هذه العلاقة : مجموع ح د س ، ص هـ ز ص يساوي ح د س .
 بشكل أوضح : اننا جمعنا احتمالات ورود كل حرف بعد حرف معين
 نحصل ببساطة على احتمال ورود هذا الحرف ، لان ورود الحرف المعني
 سيتوافق ب ورود حرف تالٍ له .

نحتاج لتمثيل عدد مضروب في نفسه مرات متتالية ، اضافة
 لاستخدامنا الجمع والطرح والضرب والتقسيم . فمثل هذه العملية
 بالرمز : $2 = \frac{2!}{1}$

أي ان العدد المضروب بنفسه هو ٢ ، بينما عدد مرات ضربه بنفسه
 في هذا المثال الخاص هو مرة واحدة .

$$4 = \frac{4!}{1}$$

أي ٢ مرفوعة للقوة ٢ ، ١ وهو مربع ال ٢ .

$$8 = \frac{4!}{2!}$$

أي ٢ مرفوعة للقوة ٣ ، وهو مكعب ال ٢ ، أي ٢ مضروبة بنفسها
 لثلاثة مرات .

نسمي في هذه الامثلة ٢ بالاساس ، بينما ١ ، ٢ ، ٣ كل منها قوة
 أو أس .

وبشكل علم اذا كتبنا 2^n فتعني ٢ مضروبة بنفسها ن مرة .

يجب ان نضيف إلى ذلك ، بهدف الإبقاء على الاتساق في الرياضيات
 التعريف التالي : $1 = 2^0$

اي اننا اذا رفعنا اي عدد للقوة . كان الناتج واحد على الدوام بصرف النظر عن هذا العدد .

تستخدم الرياضيات ايضا الاس الكسري او السالب :

$$0 = \frac{1}{0} = \frac{1}{0} = 0$$

$$\frac{1}{0} = \frac{1}{0} = 0$$

من خصائص القوى :

$$2 + 0 = 2 \times 0 = 0$$

وكاملة على ذلك نكتب :

$$11 = 7 \times 4$$

$$\frac{2}{4} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{2}{2} = 1 = 1 = \frac{2}{2}$$

اما التابع الرياضي الهام الذي استخدمناه في هذا الكتاب فهو اللوغاريتم . يمكن اللوغاريتم ان يتخذ اي اساس ، الا ان الاساس الذي استخدمناه في هذا الكتاب هو ٢ . لذا اعطينا عددا ما ، يعرف لوغاريتم هذا العدد من الاساس ٢ على انه القوة او الاس التي اذا رفعنا اليها العدد ٢ كان الناتج هو العدد المعطى لنا ونشير الى هذا اللوغاريتم بالمصطلح لع س حيث س هو العدد المعطى لنا . وهكذا يكون لدينا وفق هذا التعريف :

$$x^s = 2^s$$

مثلا :

$$لج ٨ = ٢ = لج ٢ = ٨$$

ندرج هنا بعض اللوغاريتمات من الاساس ٢ :

العدد س	لوغاريتمه لج س
١	٠
٢	١
٤	٢
٨	٣
١٦	٤
٣٢	٥
٦٤	٦

نوجز بعض خواص اللوغاريتم فيما يلي :

$$لج (أ \times ب) = لج أ + لج ب$$

$$لج \frac{أ}{ب} = لج أ - لج ب$$

$$لج ح = ح \times لج ح$$

لا تستخدم اللوغاريتمات من الاساس ٢ الا في نظرية المعلومات ، بينما تستخدم اللوغاريتمات من الاساس ١٠ أو الاساس e بشكل اكبر في فروع اخرى من العلم ، علما بان العدد e هو العدد الطبيعي النابيري :

$$e = ٢.٧١٨$$

إذا طورنا مصطلحاتنا ، فرمزا للوغاريتم س من الأساس ٢ بالرمز
 لـ س ، ومن الأساس عشرة بالرمز لـ س ، ومن الأساس ٥ بالرمز
 ١٠
 لـ س ، لحصلنا على العلاقات التالية :

$$\frac{\text{لـ س}}{10} = \text{لـ س} \times 10 = \text{لـ س} \times 10$$

$$\text{لـ س} = 2.42 \times \text{لـ س}$$

$$\frac{\text{لـ س}}{5} = \text{لـ س} \times 5 = \text{لـ س} \times 5$$

$$\text{لـ س} = 1.44 \times \text{لـ س}$$

تدعى اللوغاريتمات من الأساس ٥ باللوغاريتمات الطبيعية ولها
 بعض الخصائص الرياضية البسيطة والهامة . مثلاً إذا كان س أقل
 بكثير من الواحد تتحقق العلاقة :

$$\text{لـ س} \approx (1 + \text{لـ س})$$

لقد استخدمنا هذا التقريب في الفصل الخامس .

يشير أخيراً إلى أن ورود المصطلح لـ س في هذا الكتاب ، عنى في
 الواقع لـ س .
 ٢

المؤلف في سطور

ولد الدكتور جون . د. بيرس في ديس مونس بولاية آيوا في اميركا عام ١٩١٠ وترعرع في الغرب الاوسط الاميركي . تلقى علومه الجامعية في معهد كاليفورنيا التكنولوجي حتى حصوله على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائية .

التحق عام ١٩٣٦ بشركة بيل للهاتف وشغل فيها عدة مناصب حتى عام ١٩٧١ حيث تركها وعاد الى معهد كاليفورنيا التكنولوجي حيث يعمل الآن في منصب التكنولوجي الاول في مختبر الدفع النفاث .

ظهرت مؤلفات الدكتور بيرس في مجلة العلم الاميركي ومجلة الاطلسي الشهيرة ومجلة كورونيت ومجلات خيال علمي اخرى . اما كتبه الاخرى فهي : عالم الانسان الصوتي ، امواج الالكترن ورسائله ، الامواج والاذن ، انجيب الامواج المتحركة ، نظرية وتصميم الاشعة الالكترونية ، كل شيء عن الامواج ، واخيرا مقدمة الى علم وانظمة لاتصالات .

ينتمي الدكتور بيرس لمضوية عدة جمعيات علمية منها : الاكاديمية الوطنية للعلوم ، الاكاديمية الوطنية للهندسة ، الاكاديمية الاميركية للفنون والعلوم ، الاكاديمية السويدية الملكية للعلوم ، نقابة المهندسين الالكترنيين والكهربائيين ، جمعية الفيزياء الامريكية ، وجمعية الصوتيات الاميركية .

نال الدكتور بيرس عشر درجات تقديرية وعدد من الجوائز منها : المداينة الوطنية للعلوم ، ميدالية ادبسون ، وميدالية الشرف ، جائزة مؤسسي الاكاديمية الوطنية للهندسة ، ميدالية سيلفرون (من السويد) وميدالية فالدمار بلولسون (من الدنمارك) .

المفردات

٥	امضاء المؤلف
٧	مقدمة المؤلف
	الفصل الأول :
١٢	العالم والنظريات
	الفصل الثاني :
٢٥	اصول نظرية المعلومات
	الفصل الثالث :
٦٧	نموذج رياضي
	الفصل الرابع :
٩١	الترميز ونظام المد الثنائي
	الفصل الخامس :
١٠٩	الانتروبي
	الفصل السادس :
١٤٥	اللغة والمعنى

	الفصل السابع :
١٦٧	الترميز الفعّال
	الفصل الثامن :
١٩١	القناة ذات الضجيج
	الفصل التاسع :
٢١٧	عدة ليمسّد
	الفصل العاشر :
٢٣٩	نظرية المعلومات والفيزياء
	الفصل الحادي عشر :
٢٦٩	السيبيرنيتيك
	الفصل الثاني عشر :
٢٩٥	نظرية المعلومات وعلم النفس
	الفصل الثالث عشر :
٣١٩	نظرية المعلومات والفن
	الفصل الرابع عشر :
٣٣٩	عودة الى نظرية الاتصالات
٣٥١	ملحق رياضي
٣٦٣	المؤلف في سطور

الاعلام ، المعلومات ، الاعلاميات ، الاتصال والتواصل ، ترايد العلاقات البشرية المستمر ، تمقدها ، اتساع دائرتها ... ان تحفظ اكبر عدد ممكن من المعلومات في جهاز صغير بمتناول يدك تطلب منه ان يميد لك بعضها منها ، او كلها ، متى شئت وكيف شئت تلك حقائق نهاية القرن الحالي والقرن الذي يلي ، وحاجة انسان اليوم والغد وهو سهو . والعلم ، اي علم ، وليد حاجة صارت ملحة فالمعلم يسعى الى تلبيةها .

لهذا كانت السيرينيثيكا التي اصدرت الوزارة عنها كتابا هو في الواقع مقدمة لكتابنا هذا . وعن السيرينيثيكا نشأت الاعلاميات ونظرية المعلومات ، فما هي هذه النظرية التي بها وبها وحدها تكاد تتميز معرفيا المرحلة التاريخية الراهنة عن غيرها .

هذا الكتاب هو محاولة لوضع النظرية هذه في متناول انسان المستقبل . لن يجد القارئ كتابنا هذا سهلا ولكن ثمة حقيقة عليه ان يعرفها مسبقا وهي ان الذين يجيدون الاعلاميات هم الذين يتصرفون بمصائر الشعوب . او نظن ان القارئ العزيز ان من السهل على الانسان فردا وجماعات ان يدخل القرن الواحد والعشرين وهو محتفظ بشخصيته القومية والهضبة الموروثة هي كما هي ... !

ان نظرية المعلومات هي التي سترسم للانسان خطا سيره في المستقبل المنظور ، وربما الغير منظور .

الطبع وفرز الألوان في مطابع وزارة الثقافة

دمشق ١٩٩١

في الاصدار الهين: ٢٠٠ ل.س

سعر النسخة داخل المطبع

١٠٠ ل.س